

Д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ, к. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО,  
к. т. н. В. В. ЗУБАРЕВ, д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет, г.  
Киев, Национальный авиационный университет  
E-mail: vadim@vag.intas.odessa.ua

Дата поступления в редакцию  
18.02 2002 г. — 20. 01 2003 г.

Оппонент д. ф.-м. н. В. А. ДРОЗДОВ  
(ОИСВ, г. Одесса)

## РАДИАЦИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СУЛЬФИДА КАДМИЯ И АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

*На основе созданного радиационным легированием  $p$ — $n$ -перехода в CdS изготовлен светодиод и планируется изготовление и исследование инжекционного лазера.*

Сульфид кадмия является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны  $E=2,4$  эВ при  $T=300$  К. Возбуждение светом или электронным пучком этого материала вызывает излучательную рекомбинацию с высоким квантовым выходом. Спектры фото- или катодоллюминесценции у нелегированного монокристалла лежат в зеленой (при  $T=300$  К) и голубой (при  $T=77$  К) областях. В этой связи актуален вопрос создания светодиодов и инжекционных лазеров на основе CdS. Однако получить  $p$ — $n$ -переход на этом материале сложно, т. к. сульфид кадмия в исходном состоянии имеет  $n$ -тип проводимости. В нем наблюдается явление самокомпенсации, при котором попытка изменить электропроводность приводит к стабилизации дефектов, снимающей эффект легирования. Иными словами, с помощью диффузии акцепторных примесей невозможно изменить тип проводимости кристаллов CdS и получить в них примесную дырочную проводимость и  $p$ — $n$ -переход.

Такие  $p$ — $n$ -переходы были созданы на низкоомных кристаллах CdS методом ионного легирования, в которых наблюдалась достаточно интенсивная инжекционная люминесценция [1, 2]. Это стало возможным потому, что метод ионного легирования обеспечивает концентрацию примеси в кристалле, превышающую предел ее растворимости. При этом происходит перекомпенсация собственных доноров возникающими в результате имплантации мелкими акцепторами и образуется слой  $p$ -типа проводимости. Области с дырочной проводимостью создаются имплантацией висмута, фосфора, сурьмы и других ионов при энергии пучка  $\sim 25$  кэВ на глубину  $\sim 0,3$  мкм при  $T=300$  К без последующего отжига [1, 2].

Опыт работы с этими кристаллами показал, что такие  $p$ — $n$ -переходы ненадежны, быстро деградируют: при нагреве выше  $400^\circ\text{C}$  проводимость имплантированных слоев вновь становится электронной. Квантовый выход светодиодов, изготовленных на их основе, много меньше, чем приборов из фосфида галлия. Их нельзя использовать для создания инжекционных лазеров.

В настоящей работе для создания достаточно глубоких стабильных  $p$ — $n$ -переходов в CdS предлагается использовать метод ядерного (трансмутационного) легирования с помощью быстрых нейтронов с энергиями 14,5 МэВ. Использование тепловых нейтронов в данном случае неэффективно, т. к. они не создают акцепторных примесей.

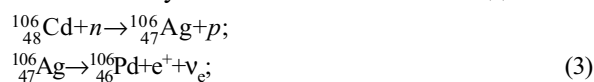
Ядерные реакции, происходящие в веществе под действием быстрых нейтронов, делятся на два типа — с образованием протонов ( $n, p$ ) и альфа-частиц ( $n, \alpha$ ) [3].

В природе существуют восемь устойчивых изотопов кадмия —  $^{106}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{108}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{110}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{111}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{112}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{113}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{114}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{116}_{48}\text{Cd}$  и четыре устойчивых изотопа серы —  $^{32}_{16}\text{S}$ ,  $^{33}_{16}\text{S}$ ,  $^{34}_{16}\text{S}$ ,  $^{36}_{16}\text{S}$ . Рассмотрим реакции типа ( $n, p$ ), происходящие в CdS. Реакции с изотопами  $^{110}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{111}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{112}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{113}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{114}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{116}_{48}\text{Cd}$  и  $^{32}_{16}\text{S}$ ,  $^{33}_{16}\text{S}$ ,  $^{34}_{16}\text{S}$ ,  $^{36}_{16}\text{S}$  не вносят никакого вклада в ядерное легирование кристаллов CdS, т. к. возникающие радиоактивные изотопы серебра и фосфора распадаются (бета-минус-распад) с малыми периодами полураспада на стабильные атомы кадмия и серы. В качестве примера приведем некоторые из этих реакций [3, 4]:



где  $\bar{e}$  — электрон;  
 $\bar{\nu}_e$  — электронное антинейтрино;  
 $p$  — протон;  
 $n$  — нейтрон.

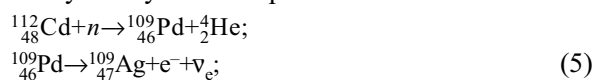
Реакции же с изотопами  $^{106}_{48}\text{Cd}$  и  $^{108}_{48}\text{Cd}$  приводят к возникновению устойчивых изотопов палладия:



где  $e^+$  — позитрон;  
 $\nu_e$  — электронное нейтрино;  
 $K$  — один из видов бета-распада:  $K$ -захват [3].

Рассмотрим теперь реакции типа ( $n, \alpha$ ). В них стабильный изотоп  $^{114}_{48}\text{Cd}$  превращается в стабильный

изотоп  $^{111}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{116}_{48}\text{Cd}$  в  $^{113}_{48}\text{Cd}$ , а стабильный изотоп  $^{36}_{16}\text{S}$  — в стабильный изотоп  $^{33}_{16}\text{S}$ . Эти реакции не дают вклада в легирование. Зато реакции с другими изотопами участвуют в легировании:



Таким образом, из реакций (3)—(13) видно, что кристалл CdS легируется стабильными изотопами палладия —  $^{105}_{46}\text{Pd}$ ,  $^{108}_{46}\text{Pd}$ ,  $^{106}_{46}\text{Pd}$ ,  $^{110}_{46}\text{Pd}$ , родия —  $^{103}_{45}\text{Rh}$ , серебра —  $^{109}_{47}\text{Ag}$ ,  $^{107}_{47}\text{Ag}$ , кремния —  $^{29}_{14}\text{Si}$ ,  $^{30}_{14}\text{Si}$  и фосфора —  $^{31}_{15}\text{P}$ . Из них палладий, родий, серебро и фосфор являются акцепторными примесями в CdS, а кремний — амфотерной [1, 2].

Рассмотрим отдельно реакцию (10). В отличие от других реакций такого типа, в которых радиоактивные изотопы имеют малые периоды полураспада и довольно быстро превращаются в стабильные изотопы легирующей примеси, в ней радиоактивный изотоп палладия ( $^{107}_{46}\text{Pd}$ ) превращается в стабильный изотоп серебра ( $^{107}_{47}\text{Ag}$ ) с периодом полураспада  $T_{1/2} = 8,6 \cdot 10^7$  лет. Так что если в кристалле CdS имеется стабильный изотоп  $^{110}_{48}\text{Cd}$ , то после облучения быстрыми нейтронами он надолго останется бета-радиоактивным. Чтобы избежать этого, при выращивании кристаллов CdS необходимо использовать кадмий без этого изотопа, что современные методы разделения изотопов и очистки материалов позволяют сделать.

Обратимся теперь к GaAs, который также является прямозонным полупроводниковым соединением с шириной запрещенной зоны  $E_g = 1,52$  эВ при  $T = 300$  К. Это соединение широко используется при изготовлении полупроводниковых светодиодов и инжекционных лазеров. В природе существует два стабильных изотопа галлия —  $^{69}_{31}\text{Ga}$ ,  $^{71}_{31}\text{Ga}$  и один стабильный изотоп мышьяка —  $^{75}_{33}\text{As}$ . Реакции типа ( $n, p$ ) не приводят к возникновению легирующей примеси, т. к. переводят перечисленные изотопы в самих себя. Реакции типа ( $n, \alpha$ ) имеют вид



Из (14) — (16) видно, что в результате этих реакций образуется легирующая примесь в виде стабильных изотопов цинка  $^{66}_{30}\text{Zn}$ ,  $^{68}_{30}\text{Zn}$  и германия  $^{72}_{32}\text{Ge}$ . Цинк в GaAs является акцепторной примесью, а германий — амфотерной.

Ядерные реакции, приводящие к образованию протонов ( $n, p$ ) и альфа-частиц ( $n, \alpha$ ), протекают с поглощением нейтронов. Рассмотрим их сечения.

Опыты, проведенные с нейтронами, имеющими энергию от 10 до 25 МэВ, дали значение радиуса ядер элементов [4]

$$R = 1,4 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \text{ см}, \quad (17)$$

где  $A$  — массовое число.

Для быстрых нейтронов с энергией  $E \sim 14,5$  МэВ сечение ядерной реакции равно [3, 4]

$$\sigma \approx \pi(R + \bar{\lambda})^2, \quad (18)$$

где  $\bar{\lambda} = l/2\pi$ ;

$\lambda$  — дебройлевская длина волны нейтрона —

$$\lambda = h / \sqrt{2m_n E} = 7,5 \cdot 10^{-13} \text{ см};$$

$h$  — постоянная Планка;

$m_n$  — масса нейтрона.

В табл. 1 приведены значения  $R$ , оцененные по формуле (17) для стабильных изотопов элементов Cd, S, Ga, As, P, Al, и их относительное содержание в исследуемых кристаллах CdS и GaAs, а также значения  $\sigma$ , оцененные по формуле (18).

Вследствие того, что сечения ядерных реакций с образованием протонов ( $n, p$ ) и альфа-частиц ( $n, \alpha$ ) в монокристаллах полупроводниковых соединений CdS и GaAs невелики (табл. 1), мишени из этих элементов выдерживают большие потоки нейтронов. Это компенсирует малые значения сечений и увеличивает выход легирующей примеси, образовавшейся в результате ядерных (трансмутационных) превращений. Для каждого из типов ядерных превращений концентрация возникающих атомов легирующей примеси вычисляется по формуле [1]

$$N = I \sigma n P, \quad (19)$$

где  $I$  — интегральный поток (доза) нейтронов;

$\sigma$  — поперечное сечение захвата;

$n = \rho N_A / A$  — число атомов исходного стабильного изотопа в  $1 \text{ см}^3$ ;

$\rho$  — плотность вещества;

$N_A$  — число Авогадро;

$P$  — относительное содержание нужного изотопа (см. табл. 1).

В табл. 2 представлены рассчитанные по формуле (19) значения концентрации легирующей примеси ( $N_1, N_2, N_3$ ), возникающей в кристаллах CdS и GaAs в результате реакций (3) — (16) соответственно при трех различных дозах облучения:  $I_1 = 3,6 \cdot 10^{17}$ ,  $I_2 = 1,5 \cdot 10^{18}$ ,  $I_3 = 6,3 \cdot 10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup>. Из таблицы видно, что изотопы  $^{106}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{108}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{33}_{16}\text{S}$ ,  $^{34}_{16}\text{S}$  дают пренебрежимо малый вклад в легирование даже при больших дозах облучения. Остальные изотопы при дозах  $I_2, I_3$  дают уже довольно существенный вклад. Например, при  $I_3$  мак-

Таблица 1

Значения радиуса ядер ( $R$ ), площади поперечного сечения захвата ( $\sigma$ ) стабильных изотопов и их относительного содержания ( $P$ ) в исследуемых кристаллах

Изотоп	$R \cdot 10^{-13}$ , см	$\sigma \cdot 10^{-26}$ , см <sup>2</sup>	Относительное содержание изотопа, $P$ , %
<sup>106</sup> <sub>48</sub> Cd	6,62	191,5	1,215
<sup>108</sup> <sub>48</sub> Cd	6,66	193,48	0,875
<sup>110</sup> <sub>48</sub> Cd	6,70	195,46	12,39
<sup>111</sup> <sub>48</sub> Cd	6,72	196,43	12,75
<sup>112</sup> <sub>48</sub> Cd	6,74	197,44	24,07
<sup>113</sup> <sub>48</sub> Cd	6,76	198,44	12,26
<sup>114</sup> <sub>48</sub> Cd	6,78	199,45	28,86
<sup>116</sup> <sub>48</sub> Cd	6,82	201,46	7,58
<sup>32</sup> <sub>16</sub> S	4,44	99,50	95,08
<sup>33</sup> <sub>16</sub> S	4,49	101,29	0,75
<sup>34</sup> <sub>16</sub> S	4,53	102,70	4,215
<sup>36</sup> <sub>16</sub> S	4,62	105,97	0,017
<sup>69</sup> <sub>31</sub> Ga	5,74	150,78	60,16
<sup>71</sup> <sub>31</sub> Ga	5,79	152,98	39,84
<sup>75</sup> <sub>33</sub> As	5,90	157,59	100,00
<sup>31</sup> <sub>15</sub> P	4,39	96,74	100,00
<sup>27</sup> <sub>13</sub> Al	4,20	91,21	100,00

симальная концентрация акцепторной примеси серебра (<sup>109</sup>Ag) составляет  $\sim 1,3 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а кремния (<sup>29</sup>Si) —  $\sim 2,1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Образующиеся в приведенных выше ядерных реакциях высокоэнергетические электроны, позитроны, протоны и альфа-частицы вносят свой вклад в разупорядочение кристалла, создавая большое количество ( $\sim 10^3$  на каждую частицу) дефектов Френкеля. Кроме того, протоны и альфа-частицы, превращаясь в атомы водорода и гелия, способствуют вакансионно-газовому распуханию и образованию пор в кристалле.

Проведенные эксперименты по облучению образцов CdS и GaAs монохроматическим пучком быстрых нейтронов с энергией 14,5 МэВ и плотностью потока  $\Phi = 1,0 \cdot 10^{11}$  нейтрон/см<sup>2</sup>·с показали, что, действительно, при дозе  $I_3 = 6,3 \cdot 10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup> (доза набиралась в течение двух лет) в этих образцах имеются значительные концентрации ( $\sim 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>) акцепторной примеси серебра, палладия, кремния, цинка и германия, являющейся основным поставщиком свободных дырок. Результаты масс-спектроскопических измерений подтверждают наличие указанных примесей. (В опытах использовались монокристаллы CdS, специально выращенные с использованием очищенного кадмия, не содержащего изотоп <sup>110</sup><sub>48</sub>Cd.)

Для получения слоев с устойчивой дырочной проводимостью кристаллы CdS и GaAs отжигались в вакууме в течение двух суток при температуре 500°C. Выбор таких значений температуры обусловлен следующими соображениями. Как указывалось выше,

Таблица 2

Расчетные значения концентраций легирующих примесей

Исходный изотоп	Продукт реакции (легирующая примесь)	$N_1$ , см <sup>-3</sup>	$N_2$ , см <sup>-3</sup>	$N_3$ , см <sup>-3</sup>
<sup>106</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>106</sup> <sub>46</sub> Pd, <sup>103</sup> <sub>45</sub> Ph	$4,1 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$7,1 \cdot 10^{15}$
<sup>108</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>108</sup> <sub>46</sub> Pd, <sup>105</sup> <sub>46</sub> Pd	$2,9 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{15}$	$5,1 \cdot 10^{15}$
<sup>112</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>109</sup> <sub>47</sub> Ag	$7,8 \cdot 10^{15}$	$3,2 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{17}$
<sup>111</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>108</sup> <sub>46</sub> Pd	$4,1 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{16}$	$7,2 \cdot 10^{16}$
<sup>113</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>110</sup> <sub>46</sub> Pd	$4,0 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{16}$	$4,0 \cdot 10^{16}$
<sup>110</sup> <sub>48</sub> Cd	<sup>107</sup> <sub>47</sub> Ag	$4,0 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{16}$	$7,1 \cdot 10^{16}$
<sup>33</sup> <sub>16</sub> S	<sup>30</sup> <sub>14</sub> Si	$9,5 \cdot 10^{13}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$1,6 \cdot 10^{15}$
<sup>34</sup> <sub>16</sub> S	<sup>31</sup> <sub>15</sub> P	$5,3 \cdot 10^{14}$	$2,2 \cdot 10^{15}$	$9,2 \cdot 10^{15}$
<sup>32</sup> <sub>16</sub> S	<sup>29</sup> <sub>14</sub> Si	$1,2 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{16}$	$2,1 \cdot 10^{17}$
<sup>69</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>66</sup> <sub>30</sub> Zn	$1,6 \cdot 10^{16}$	$6,9 \cdot 10^{16}$	$2,9 \cdot 10^{17}$
<sup>71</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>68</sup> <sub>30</sub> Zn	$1,0 \cdot 10^{16}$	$4,5 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{17}$
<sup>75</sup> <sub>33</sub> As	<sup>72</sup> <sub>32</sub> Ge	$2,6 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{17}$	$4,5 \cdot 10^{17}$
<sup>31</sup> <sub>15</sub> P	<sup>28</sup> <sub>14</sub> Si	—	—	$2,4 \cdot 10^{17}$

во всех исследуемых кристаллах в результате ядерного легирования образуются газы — водород и гелий. Атомы этих газов, проникая в поры, образующиеся в процессе длительного облучения, создают в них газокинетическое давление. Нами обнаружен следующий эффект: при определенной критической температуре (назовем ее температурой взрыва)  $T_c < T_{пл}$  ( $T_{пл}$  — температура плавления кристалла) газы стремительно выделяются, разрушая окружающий их кристалл на мельчайшие осколки. Это усугубляется, очевидно, еще и тем, что образование газов при нейтронном облучении увеличивает хрупкость кристалла.

Проведем оценку величины  $T_c$ . Рассмотрим пору диаметром  $d = 300 \text{ \AA}$ , возникающую при облучении кристалла CdS дозой  $I_2 = 1,5 \cdot 10^{18}$  нейтрон/см<sup>2</sup>. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа дает следующее выражение для газокинетического давления при температуре  $T$ :

$$P = nkT, \tag{20}$$

где  $n = Nq$  — концентрация молекул газа;  
 $N$  — концентрация пор ( $N = 2,2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, вычислено по формуле (15) из работы [5]);  
 $q$  — число молекул в одной поре ( $q = V_{II} / V_M = 350$ );  
 $V_{II}$  — объем поры ( $V_{II} = 14,13 \cdot 10^{-18}$  см<sup>3</sup>);  
 $V_M$  — объем молекулы ( $V_M \approx 4 \cdot 10^{-20}$  см<sup>3</sup>);  
 $k$  — постоянная Больцмана.

Таким образом, газокинетическое давление в 1 см<sup>3</sup> кристалла равно

$$P = nkT = NqkT. \tag{21}$$

С другой стороны, плотность энергии деформации кристаллической решетки равна

$$P = \sigma^2 / 2E, \quad (22)$$

где  $\sigma \approx \mu / 30 = 3,3 \cdot 10^4$  кгс/см<sup>2</sup> — теоретический предел прочности кристаллической решетки хрупких монокристаллов;

$\mu \sim 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup> =  $10^6$  кгс/см<sup>2</sup> — модуль сдвига;  
 $E \sim 1,6 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup> — модуль Юнга или модуль упругости.

Приравнивая (21) и (22), найдем:

$$T_c = \sigma^2 / 2ENqk, \quad (23)$$

откуда  $T_c = 8,8 \cdot 10^3$  К.

Следует отметить, что никогда не бывает абсолютного хрупкого (т. е. без заметной пластической деформации) разрушения, к которому относится проведенная оценка, и перед разрушением обязательно появляются хотя бы незначительные пластические сдвиги, искажающие кристаллическую решетку и резко снижающие прочность на разрыв. Практически разрушение кристалла начинается локально в слабом и наиболее напряженном участке, так что для хрупких тел, так же, как и для пластичных, измеряемая прочность ниже теоретической на несколько порядков. Поэтому оценка критической температуры  $T_c$ , проведенная по формуле (23), дает завышенное значение (значительно выше  $T_{пл}$  кристалла). Оценка по той же формуле с учетом измеряемой прочности дает значение  $T_c \sim 1000$  К, что соответствует реально измеренному значению. Давление, соответствующее этой температуре и вычисленное по формуле (21), равно  $P = 7,24 \cdot 10^8$  дин/см<sup>2</sup> = 714 атмосфер.

Измерение эффекта Холла на отожженных образцах CdS  $p$ -типа проводимости толщиной  $\sim 90$ — $100$  мкм дало значение концентрации дырок  $N \sim (3 \dots 5) \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Это, видимо, связано с тем, что возникающий при облучении избыток вакансий кадмия и междоузельных атомов серы обладает акцепторными свойствами [6]. При отжиге не все эти дефекты компенсируются, и оставшаяся их часть вместе с легирующими примесями вносит свой вклад в дырочную проводимость полупроводниковых слоев. Из этого следует, что за счет ядерного легирования кристаллов CdS в них значительно ослабляется тенденция к самокомпенсации.

Известно, что атомы водорода при температурах меньше 273 К имеют свойство быстро связываться в нейтральные молекулы H<sub>2</sub>, а гелий — одноатомный

нейтральный газ, и поэтому они не вносят никакого вклада в проводимость. Однако атомарный водород может создавать дефекты, также ограничивающие тенденцию к самокомпенсации [6].

\*\*\*

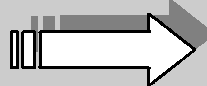
В результате исследований в низкоомных ( $\sim 100$  Ом·см) кристаллах CdS и GaAs  $n$ -типа проводимости были получены стабильные  $p$ — $n$ -переходы. На поверхности образцов с  $p$ — $n$ -переходами с помощью лазерной технологии формировались омические контакты [7].

Светодиоды из CdS имеют следующие параметры: мощность излучения при токе 20 мА на тестовых образцах  $\sim 5,0$ — $5,5$  мВт; длина волны в максимуме излучения 550 нм, прямое падение напряжения  $\sim 1,5$  В. Параметры светодиодов из GaAs мало отличаются от серийно выпускаемых типа АЛ 156: мощность излучения при токе 100 мА —  $\sim 10$  мВт, длина волны в максимуме излучения — 870 нм, прямое падение напряжения —  $\sim 1,8$  В.

Таким образом, используя метод ядерного легирования с помощью быстрых нейтронов, можно создавать в кристаллах CdS и в других полупроводниковых соединениях стабильные слои  $p$ -типа проводимости и  $p$ — $n$ -переходы, пригодные для изготовления светодиодов и инжекционных лазеров.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники.— М.: Наука, 1988.
2. Вавилов В. С. Технология ионного легирования.— М.: Сов. радио, 1974.
3. Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Т. 1. Физика атомного ядра.— М.: Атомиздат, 1979.
4. Крамер-Агеев Е. А., Лавренчик В. Н., Самосадный В. Т., Протасов В. П. Экспериментальные методы нейтронных исследований.— М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Гаркавенко А. С. Радиационное распухание кристаллов полупроводниковых соединений / Ядерная и радиационная безопасность.— 2000.— Т. 3, вып. 4.— С. 87—89.
6. Георгобяни А. Н., Котляревский М. Б. Проблемы управления составом точечных дефектов в соединениях A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> / В кн.: Физика соединений A<sub>2</sub>B<sub>6</sub>.— М.: Наука, 1986.— С. 87—94.
7. Гаркавенко А. С., Кособуцкий П. С., Мокрицкий В. А. Формирование омических контактов на поверхности полупроводниковых соединений // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1993.— № 2.— С. 40—41.



## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ "ТКЭА" ВЫ МОЖЕТЕ ЗАКАЗАТЬ

по электронной почте <tkea@odessa.net> pdf-файлы любых статей, опубликованных в журнале за период с 1998 по 2003 год.

С содержанием номеров можно ознакомиться на сайте  
<http://tkea.wallst.ru/>

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ "ТКЭА"

