

УДК 541.134 : 535.217

В.А. Батенков

## Электрохимическая природа фотопотенциала

**Фотопотенциал**  $E_{\phi}$  – это отклонение потенциала освещенного электрода ячейки  $E_{\text{ит}}$  от его значения  $E$ , измеренного в темноте:  $E_{\phi} = \Delta E_{\phi} = E_{\text{ит}} - E$ . При этом через освещенный электрод внешний ток может протекать или нет.

Фотопотенциал и фототок – явления, присущие лишь полупроводниковым электродам. Как и твердотельные фотоэлементы, фотоэлектрохимические элементы (ФЭХЭ), т.е. жидкостные фотоячейки с полупроводниковыми электродами могут быть источниками тока. Преимуществом ФЭХЭ по сравнению с твердотельными фотоэлементами являются простота изготовления, использование значительно более дешевых поликристаллических полупроводниковых материалов. Однако главное достоинство ФЭХЭ – это возможность их использования в качестве фотоэлектролизёров, например, воды, что позволяет аккумулировать солнечную энергию в виде экологически чистого энергетического топлива – водорода, полученного фотоэлектролизом. Значение таких устройств, позволяющих использовать неисчерпаемую солнечную энергию, для решения проблем энергетики очевидно.

В физике полупроводников фотопотенциал объясняется изменением падения потенциала (напряжения) в области пространственного заряда полупроводника (ОПЗ), вследствие изменения в ней под воздействием света концентрации неравновесных носителей. При освещении полупроводника генерация носителей тока происходит путем возбуждения: 1) валентных электронов с переходом их в зону проводимости (переход «зона–зона») – собственная генерация пары  $e^+ + e^-$ ; 2) электронов примесных атомов с переходом их с донорных уровней в зону проводимости и валентных электронов с их переходом на акцепторный уровень – примесная генерация.

Длинноволновая (красная) граница излучения собственного возбуждения  $\lambda_{\text{нб}}$  зависит от ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$  [1]:

$$\lambda_{\text{нб}} = c/\nu = ch/h\nu = 1.24/h\nu = 1.24/\Delta E_g \text{ (мкм)}. \quad (1)$$

Фотоны с длиной волны  $\lambda > \lambda_{\text{нб}}$ , т.е. с энергией  $h\nu$ , меньше ширины запрещенной зоны  $\Delta E_g$ , не образуют пары  $e^+ + e^-$ . Возможна примесная фотогенерация носителей, но она весьма мала, так как при 25 °С в n-типе доноры обычно уже полностью ионизированы. Фотоны с энергией  $h\nu > \Delta E_g$  дают вклад в фотоэффект, равный только  $\Delta E_g$ . Остальная часть энергии фотона переходит в

тепло. Максимальная квантовая эффективность света  $\eta_{\text{нв}}$  будет наблюдаться, когда длина волны излучения будет чуть меньше  $\lambda_{\text{нб}}$  или  $h\nu \geq \Delta E_g$ .

Экспериментальные данные показывают, что в отсутствие внешнего тока через полупроводник фотоэффект его контактов с металлом и электролитом наиболее заметно проявляется для невырожденного полупроводника n-типа. Поэтому в дальнейшем рассматривается фотопотенциал полупроводников, у которых  $n_0 \gg p_0$  и диффузионная длина дырок (диффузионный слой)  $L_p > L_1$  ( $L_1$  – толщина ОПЗ). Это выполняется для таких невырожденных полупроводников как германий, кремний, арсенид галлия и им подобных. Для них уравнение, полученное В.В. Гертнером [2] для фототока, возникающего при освещении обеднённого слоя обратного смещённого фотодиода p-i-n, имеет вид:

$$i_{\phi} = e\Phi_0 [1 - (e\alpha L_1)/(1 + \alpha L_p)]. \quad (2)$$

Здесь  $\Phi_0$  – плотность потока фотонов, прошедших в полупроводник,  $\alpha$  – линейный коэффициент поглощения, зависящий от длины волны излучения и свойств вещества, поглощающего свет,  $e$  – заряд электрона.

Это уравнение используется и для описания фотоявлений на контакте полупроводника n-типа с металлом и электролитом [1, 3]. При преобразовании видимого света в фототок весьма эффективны контакты полупроводников n-типа, таких как кремний, арсенид галлия, потому что их  $\Delta E_g$  соответствует максимуму энергии солнечного света. У них велик коэффициент поглощения  $\alpha$  ( $10^4$ – $10^6$  см<sup>-1</sup>) и поэтому мала глубина проникновения  $1/\alpha$  (0.01–1 мкм). Свет поглощается в ОПЗ, что приводит к высокой квантовой эффективности [1].

Приведенные выше общепринятые электрофизические объяснения фотопотенциала полупроводников игнорируют реальное атомно-молекулярное строение контакта полупроводника с металлом, электролитом и электрохимические процессы, протекающие на этом контакте при освещении, хотя эти процессы являются причиной фотопотенциала. Ниже приведено электрохимическое объяснение природы фотопотенциала полупроводников.

**Экспериментальные значения фотопотенциала полупроводников.** Ниже описываются фотоэффекты для стационарного освещения, которое используется в фотоэлементах и ФЭХЭ. Обоб-

шая экспериментальные данные [3–14], можно сделать следующие заключения.

1. Исходное темновое, постоянное во времени значение потенциала полупроводникового электрода, например, германия, соединений  $A^{III}B^V$  после погружения его в неокислительный раствор, где скорость коррозии электрода сопоставима с током обмена, устанавливается медленно (20–120 мин) и плохо воспроизводимо. Процесс установления и воспроизводимость потенциала существенно зависят от начальной подготовки электрода, чистоты раствора и его pH. Отклонения стационарного потенциала от среднего значения: в щелочных растворах – до  $\pm 0,02$  В, в нейтральных и кислых – до  $\pm 0,04$  и  $\pm 0,05$  В [4–13]. В темноте тип проводимости и концентрация легирующей примеси, а также кристаллографическая ориентация рабочей поверхности монокристалла в пределах ошибки измерений не влияют на электродный потенциал полупроводника, исключая крайние значения pH: меньше 1 и больше 13 [4, 5].

2. При освещении полупроводника его исходный темновой потенциал сначала изменяется очень быстро (в доли секунд), а через 5 мин весьма медленно, достигая стационарного значения через 7–15 мин. После выключения освещения его темновое значение возвращается, также сначала быстро, а затем все медленнее (см. рис. 1). Эти изменения описываются уравнением [15]:

$$(1/E_\phi) = A + B \lg(1/t), \quad (3)$$

где A и B – постоянные,  $B^{-1}$ ; t – время, мин. Для n-GaP (рис. 1):  $A = -1,6 \pm 0,1$ , при освещении  $B = -0,6$ , в темноте  $B = +0,4$ . Для n-GaAs:  $A = -2,3 \pm 0,2$ , при освещении  $B = -0,4$ , в темноте  $B = +0,5$ .

Потенциал полупроводника в конце освещения при увеличении числа циклов свет/темнота (по 5 мин) почти не изменяется. В темноте в конце цикла 1 он заметно уменьшается, но затем это уменьшение мало.

3. Потенциал полупроводникового электрода уменьшается с ростом pH как потенциал металлоксидного электрода:  $E = a - bpH$ . Наклон прямой E, pH, т.е. коэффициент  $b = \Delta E / \Delta pH$ , для германия и галлиевых соединений  $A^{III}B^V$ , в области pH 1–12 достигает 0,059 В при 25 °С [4–14] (табл. 1).

В таблице 1 приведены экспериментальные зависимости E, pH, полученные для электродов из германия, фосфидов, арсенидов и антимонидов галлия и индия n-типа в 0,1 моль/л растворе KCl, pH которого изменялся через 0,5–1,5 pH добавлением раствора HCl (до pH 1) или KOH (до pH 12). Измерение потенциалов проводилось в темноте и на свету, в атмосфере воздуха и азота. Освещение – рассеянный дневной свет или лампа накаливания [4–14].

В отсутствие окислителей изменение pH раствора, существенно меняя темновое значение потенциала полупроводникового электрода, практически не влияет на его фотопотенциал. Это потому, что освещение, значительно уменьшая электродный потенциал невырожденного полупроводника p-типа, не изменяет его темновой зависимости от pH во всем диапазоне pH (см. табл. 1) [5–15]. Восстановители также существенно не изменяют  $E_\phi$ .

4. Фотопотенциал **невырожденного** полупроводника n-типа при разомкнутой цепи велик (сотни милливольт) и отрицателен (см. рис. 1, табл. 1). Он слабо зависит от концентрации электронов до её значения, соответствующего началу вырождения полупроводника. С этой концентрации электронов фотопотенциал

Таблица 1

Зависимость электродного потенциала германия n-типа и полупроводников  $A^{III}B^V$  n-типа от pH в темноте и на свету

Полупроводник	$\Delta E_g$ , эВ	$\Delta G^\circ_{\text{образ}}$ , кДж/моль	Область pH	$E = a - bpH$ , мВ		Л
				В темноте	На свету	
Ge	0.66	0.0	0...4	80 – 59 pH	–50 – 59 pH	[
			8...10	200 – 59 pH	–20 – 59 pH	
GaP	2.25	–97.9	1...12	610 – 59 pH	–410 – 30 pH (pH 1–7)	
					–280 – 50 pH (pH > 7)	
GaAs	1.42	–72.8	1...8	340 – 59 pH	–140 – 57 pH	
GaSb	0.72	–38.1	1...12	155 – 59 pH	–100 – 58 pH	
InP	1.35	–73.7	1...3	350 – 59 pH	–	
			3...10	220 – 20 pH	–90 – 10 pH	
			> 10	650 – 63 pH	430 – 63 pH	
InAs	0.36	–48.5	1...11	250 – 33 pH	От света не зависит	
InSb	0.17	–25.7	1...12	90 – 36 pH	То же	

полупроводника начинает быстро уменьшаться и, например, для  $n\text{-GaAs}$   $n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при обычном (дневном) освещении он не отмечается. Полупроводники InSb и InAs при 300 К вырождены, их электродный потенциал не зависит от освещения (см. табл. 1). Для полупроводников p-типа фотопотенциал положителен и мал (милливольты).

5. Фотопотенциал  $E_\phi$  и фототок  $I_\phi$  заметно возникают при освещении полупроводника n-типа фотонами с энергией, равной или большей ширины запрещенной зоны:

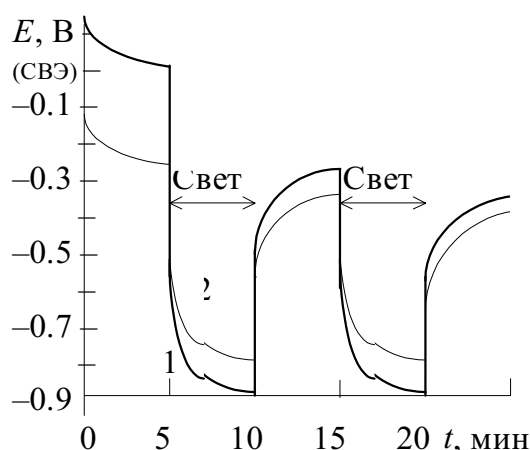


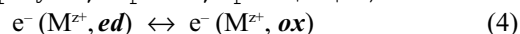
Рис. 1. Кинетика изменения электродного потенциала n-GaP ( $n = 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) (1) и n-GaAs ( $n = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , (111)В) (2) в темноте и при освещении ртутной лампой.  $E_e = 2.7 \text{ мВт/см}^2$ . 0.1 моль/л раствор  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , насыщенный KCl, pH 9.5. 23°C [19]

$h\nu \geq \Delta E_g$ . С дальнейшим ростом энергии фотонов фотопотенциал почти не изменяется. Он растёт с увеличением **интенсивности освещения** и для полупроводников n-типа достигает значений: при обычном солнечном освещении:  $E_\phi \approx (1/2)\Delta E_g$  (см. табл. 1 и 2, рис. 2); при 1000-кратном солнечном освещении:  $E_\phi \approx (2/3)\Delta E_g$  (см.  $V_{\text{ок}}$  в [1], с. 435, рис. 38).

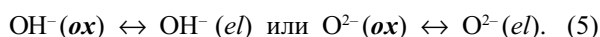
**Электрохимическое объяснение фотопотенциала.** Экспериментальные данные свидетельствуют, что фотопотенциал для контакта полупроводника с электролитом или металлом проявляется, когда на поверхности полупроводника существует слой оксидов или в общем случае слой соединений с ионной или полярной связью. Наличие ок-

сидов на поверхности германия и соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  подтверждается их непосредственным обнаружением и поведением полупроводников как металлоксидных электродов.

1. Для оксидного электрода характерны два основных равновесия: **электронное** на границе металл (электропроводящая фаза) – оксид (см. в [16] рисунок, строка 7, граница 1|2а):



и **ионное** на границе оксид – электролит ([16], рисунок, граница 2г|3):



Здесь **ed** – электрод, **ox** – оксид, **el** – электролит.

Электронное равновесие (4) совместно с электрохимической реакцией



определяет **стандартный потенциал электрода**. Оно не имеет прямого отношения к электролиту. Ионное равновесие (5), напротив, не имеет отношения к материалу электрода и определяет зависимость потенциала оксидного электрода от состава и свойств электролита и оксида. Электродный потенциал полупроводника (электропроводящая фаза), покрытого сплошным слоем оксида, находящегося в электронном равновесии с полупроводником, реально является потенциалом не внутренней электропроводящей фазы, а именно этого оксида, находящегося в ионном равновесии с раствором.

2. Сравнение при pH = 0 экспериментальных значений потенциала таких полупроводников как германий и соединения  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  (см. табл. 1) с термодинамическими (табл. 2, рис. 2), рассчитанными по

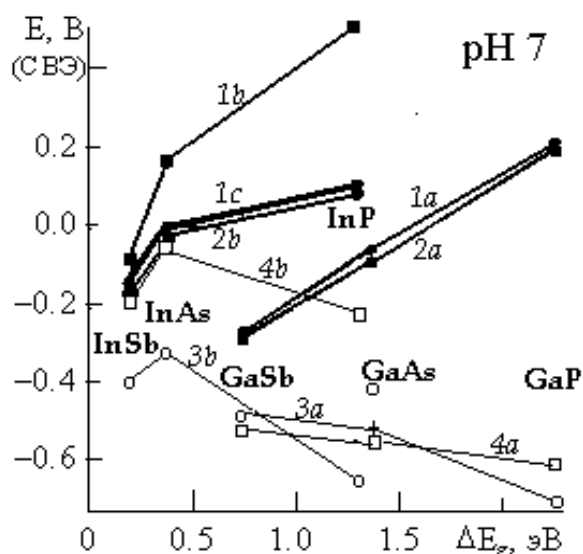


Рис. 2. Термодинамические (1,3) и экспериментальные (2,4) значения электродного потенциала полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  n-типа с разной шириной запрещённой зоны [12,16–20].

a – галлиевые, b, c – индиевые полупроводники  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ; 2а, 2b – в темноте; 4а, 4b – на свету. 1а, 1b – равновесные реакции **a** с участием  $\text{A}_2\text{O} + \text{B}$  (для GaSb –  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ); 1c – равновесные реакции **a** с участием  $\text{In}(\text{OH})_2 + \text{B}$ ; 3а, 3b – равновесные реакции **b** с участием  $\text{A}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$  (или  $2 \text{H}_3\text{PO}_3$ ), для GaAs – это точка «о»; точка «+» – для равновесной реакции с участием  $\text{Ga}_2\text{O}_3 + 2\text{As}$ . Условия эксперимента: 0.1 моль/л KCl, pH 7.0, атмосфера  $\text{N}_2$ , освещение – вольфрамовая лампа ( $5 \dots 20 \text{ мВт/см}^2$ ). Использованы данные таблиц 1 и 2.

энергии Гиббса для целого ряда равновесных реакций, позволяет сделать следующие выводы.

Как видно из сравнения данных таблиц 1 и 2, в темноте эмпирические значения электродных потенциалов полупроводников (табл. 1) близки к их термодинамическим значениям для реакций **a** (табл. 2) с участием соединений низших степеней окисления германия и элементов А и В.

**a)  $\text{GeO}_{\text{корич}}$  +  $2\text{H}^+$  +  $2\text{e}^- = \text{Ge} + \text{H}_2\text{O}$**  – для германия,

**$\text{Ga}_2\text{O} + \text{B} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{Ga}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}} + \text{H}_2\text{O}$**  – для галлиевых соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ,

**$\text{In}(\text{OH})_2 + \text{B} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{In}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}} + \text{H}_2\text{O}$**  – для индиевых соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ .

Для них значение стандартного потенциала максимально.

Электродные потенциалы германия и **галлиевых** полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  соответствуют потенциалу металлоксидного электрода ( $b = 0.059 \text{ В}$ ). Электродные потенциалы **индиевых** полупроводников  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  в темноте, в слабнокислой среде также близки к потенциалу металлоксидного электрода, однако в широкой области pH (~ 3–10) наклон  $b = \Delta E / \Delta \text{pH}$  в два, три и более раз меньше 0,059 В. Такую слабую зависимость потенциала от pH трудно приписать какой-либо реакции с участием атомов полупроводника. Проявление линейной зависимости потенциала полупроводника от концентрации окислителя в растворе при pH 3–10 [11–13] свидетельствует об увеличении и даже преобладании электронной, а не ионной проводимости оксидных слоёв и навязывании электроду окислительно-восстановительного потенциала частиц раствора.

3. При освещении значения потенциала полупроводника **n-типа** (табл. 1) приближаются к теоретически рассчитанным для реакций **b** с учас-

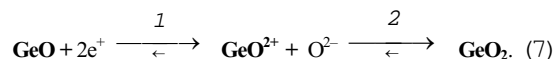
тием соединений более окисленных атомов германия и элементов А и В (табл. 2):

**b)  $\text{GeO}_{2,\text{гексаг}}$  +  $4\text{H}^+$  +  $4\text{e}^- = \text{Ge} + 2\text{H}_2\text{O}$ ,**

**$\text{A}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3 + 12 \text{H}^+ + 12 \text{e}^- = \text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}} + \text{H}_2\text{O}$ .**

Стандартные потенциалы для реакций **b** меньше, чем для реакций **a**. Поэтому освещение уменьшает электродный потенциал полупроводника n-типа.

Эти экспериментальные факты и сравнения приводят к выводу, что **освещение влияет на вид и характер процессов, определяющих стандартный потенциал полупроводника**, т.е. процессов, протекающих на границе полупроводник/оксид (см. в [16] рисунок, граница 1|2a(2b)). А именно – освещение способствует доокислению внутреннего слоя 2a, например, по схеме:



Причём очень быстрое начальное изменение потенциала (стадия 1) связано скорее не с движением ионов, а с переносом электронов от поверхностных атомов слоя 2a в полупроводник с участием дырок  $\text{e}^+$ , генерированных светом. Дальнейшие более медленные изменения потенциала (стадия 2) обусловлены перестройкой внутреннего полиоксидного слоя 2a и 2b ([16], рисунок), связанной с перемещением катионов более окисленных атомов полупроводника и ионов  $\text{O}^{2-}$ . Скорость этих перемещений зависит от градиента концентрации ионов в твёрдой фазе и все более уменьшается во времени.

4. Выключение освещения приводит к резкому уменьшению в n-типе концентрации неосновных носителей ( $\Delta p \rightarrow 0$ ), и процессы (7) в соответствии с законом действующих масс меняют направление на противоположное. Это приводит к восста-

Таблица 2

Стандартные электродные потенциалы германия и соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$

Полупроводник	$\Delta E_g$ , эВ	Продукты реакции полупроводника		
		Реакция а	$E^\circ$ , мВ	Реакция б
Ge	0,66	$\text{GeO}_{\text{корич}}$	100	$\text{GeO}_{2,\text{гексаг}}$
GaP	2,25	$\text{Ga}_2\text{O}$ , 2P	615	$\text{Ga}_2\text{O}_3$ , $2\text{H}_3\text{PO}_4$
GaAs	1,42	$\text{Ga}_2\text{O}$ , 2As	354	$\text{Ga}_2\text{O}_3$ , $\text{As}_2\text{O}_3$
GaSb	0,72	$\text{Ga}_2\text{O}$ , $\text{Sb}_2\text{O}_3$	166	$\text{Ga}_2\text{O}_3$ , $\text{Sb}_2\text{O}_3$
InP	1,35	$\text{In}(\text{OH})_2$ , P	503	$\text{In}_2\text{O}_3$ , $2\text{H}_3\text{PO}_4$
InAs	0,36	$\text{In}(\text{OH})_2$ , As	370	$\text{In}_2\text{O}_3$ , $\text{As}_2\text{O}_3$
InSb	0,17	$\text{In}(\text{OH})_2$ , Sb	252	$\text{In}_2\text{O}_3$ , $\text{Sb}_2\text{O}_3$

новлению исходного, темнового, менее окисленного полиоксида [16], к смене реакций **b** на реакции **a** и увеличению стандартного потенциала, что вызывает увеличение измеряемого электродного потенциала.

5. Участие воды и ее ионов в образовании оксидов (реакции типа **a** и **b**) в их растворимости и в установлении равновесия типа (5) приводит к зависимости потенциала оксидного электрода от концентрации ионов воды, т.е. от pH. На равновесие (5) освещение полупроводника влияния не оказывает при любых pH. Поэтому нет влияния pH на его фотопотенциал. Изменения фотопотенциала от pH возможны тогда, когда от него зависит растворимость оксида и часть поверхности полупроводника оголяется, или увеличивается электронная проводимость оксида, или изменяется степень окисления его атомов.

6. Окислители, доокисляя полиоксид и изменяя его состав, увеличивают в его составе долю оксидов более высоких валентных состояний и развитие уже в темноте реакций типа **b** [16]. Это приводит к уменьшению исходного темнового значения стандартного и электродного потенциала полупроводника  $E$  и, следовательно, фотопотенциала:  $E_{\phi} = E_{it} - E$ . Фотопотенциал не возникает при высокой окислительной способности раствора, особенно в травителях, потому что атомы полупроводника сразу окисляются до максимальных степеней окисления и значение  $E$  приближается к значению  $E_{it}$ .

Таким образом, вышеизложенное свидетельствует, что фотопотенциал проявляется при наличии на поверхности полупроводника слоя его оксидов низших степеней окисления, которые образуются тогда, когда в полупроводнике  $n$ -типа очень мало дырок, т.е. дефектов в ковалентных связях, для генерации которых требуется высокая энергия, равная ширине запрещенной зоны. При освещении полупроводника фотоны с достаточной энергией переводят электроны ковалентных связей, прежде всего, поверхностных атомов полупроводника, в междоузлия его решетки (в зону

проводимости). Происходит доокисление, т.е. повышение валентного состояния поверхностных атомов, что приводит к уменьшению электродного потенциала. Возникает фототок, плотность которого пропорциональна плотности фотонов, проникающих в полупроводник. Частично, в виду обратимости процессов (7), электроны из металла или электролита, туннелируя через оксид, восстанавливают двухэлектронные ковалентные связи (рекомбинация дырок валентной зоны), дефекты в которых, однако, снова генерируются фотонами. Если освещение выключается, то ковалентные связи восстанавливаются, уменьшается степень окисления поверхностных атомов и их оксидов, снова возрастает стандартный и, следовательно, электродный потенциал.

В невырожденном полупроводнике  $n$ -типа отсутствие существенного влияния на фотопотенциал концентрации донорной примеси, по-видимому, связано, во-первых, с независимостью от нее межзонной генерации фотонами пар  $e^+ + e^-$ . Во-вторых, увеличение расстояния между катионами донорной примеси с уменьшением ее концентрации компенсируется ростом длины пробега электронов при их переходе от катиона к катиону, т.е. увеличением их времени жизни. В-третьих, при уменьшении концентрации донорной примеси возрастает влияние других, неконтролируемых примесей, проявляющих донорные свойства, например, кислорода.

В полупроводнике  $p$ -типа дырок много, но их энергетические уровни смещены по сравнению с  $n$ -типом почти на ширину запрещенной зоны в положительную сторону (см. в [3] рис. 3.23). Это обусловлено природой акцепторной примеси, которая менее благородна, чем атомы полупроводника. Примерно на эту же величину увеличивается электрохимический потенциал (энергия Гиббса) и, следовательно, при освещении уменьшается способность к доокислению атомов полупроводника внутреннего оксидного слоя, особенно у полупроводников с большой шириной запрещенной зоны.

## Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. М., 1984.
2. Gdnrner W.W. Depletion-Layer Photoeffects in Semiconductors // Phys. Rev. 1959, V. 116. N1.
3. Гуревич Ю.Я., Плесков Ю.В. Фотоэлектрохимия полупроводников. М., 1983.
4. Lovreček B., Bockris O'M. Potential of Semiconductor – Solution Interface in Absence of Net Current Flow: Ge // J. Phys. Chem. 1959. V. 65. №9.
5. Батенков В.А., Катаев Г.А. Диаграмма равнове-

сия электродный потенциал арсенид галлия – вода // Арсенид галлия. Вып. 2. Томск, 1969.

6. Батенков В.А., Пронина И.Т., Катаев Г.А. Влияние некоторых факторов на стационарный потенциал GaAs // Арсенид галлия. Томск, 1968.

7. Giber J., Vajasdu-Perczel J. et al. Study of the rest and polarisation Potentials of chemically treated Geranium Single Crystal Surface // Acta Chim. Acad. Sci. Hung. 1972. V. 72(1). Ibid. V. 73(3).

8. Батенков В.А. Зависимость электродного потенци-

ала германия от состава раствора // Применение физико-химических методов в исследовании состава и свойств химических соединений. Барнаул, 1982.

9. Батенков В.А., Стукалова И.Н., Козлова Л.Ю. Диаграмма электродный потенциал – рН для системы антимонид галлия – вода // Электрохимия. 1987. Т. 23. №9.

10. Батенков В.А., Стукалова И.Н., Беленок Т.М. Диаграмма Е-рН для равновесной системы GaP – H<sub>2</sub>O. Барнаул, 1984. Деп. в ВИНТИ 04.10.84. №1005хп-84Деп.

11. Батенков В.А., Стукалова И.Н., Морина Е.В. Диаграмма Е-рН для равновесной системы InSb – H<sub>2</sub>O. Барнаул, 1984. Деп. в ВИНТИ 04.10.84. №1004хп-84Деп.

12. Батенков В.А., Стукалова И.Н., Евполова Л.И. Диаграмма Е-рН для равновесной системы InAs – H<sub>2</sub>O.

Барнаул, 1984. Деп. в ВИНТИ 11.09.84. №933хп-Д84.

13. Батенков В.А., Стукалова И.Н., Нейскаш И.Н. Диаграмма Е-рН для равновесной системы InP – H<sub>2</sub>O. Барнаул, 1984. Деп. в ВИНТИ 11.09.84. №932хп-Д84.

14.21. Батенков В.А., Стукалова И.Н. Термодинамические и экспериментальные значения электродных потенциалов полупроводников A<sup>III</sup> B<sup>V</sup> // Термодинамика и материаловедение полупроводников: Тез. докл. третьей Всесоюз. конф. Т. 2. М., 1986.

15. Батенков В.А., Лобарец А.И., Иванова И.И. Фотоэлектрохимические реакции на арсениде и фосфиде галлия // Химизация народного хозяйства – важное условие ускорения научно-технического прогресса: Тез. докл. научно-практ. конф. 1987. Барнаул, 1987.

16. Батенков В.А. Равновесный полиоксидный электрод // Известия АГУ. 1997. №1.