

ГЕТЕРОВАРИЗОННЫЙ GaAlAs-ФОТОЭЛЕМЕНТ — СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛОГ ГЛАЗА

II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Резников Б. И., Стамкулов А. А., Таурбаев Т. И.,
Царенков Б. В., Царенков Г. В.

Представлена реализация гетероваризонного GaAlAs-фотоэлемента — спектрального аналога глаза.

Изготовлены пробные GaAlAs-структуры и доказана применимость теоретической модели к реальной структуре. Доказательством служило достаточно близкое совпадение теоретического спектра (полученного путем варьирования основных параметров модельной структуры) с экспериментальным при таких значениях основных параметров модельной структуры, которые практически совпали с известными для пробной структуры.

Проведена оптимизация основных параметров структуры, направленная на изготовление структуры со спектром, максимально приближенным к спектру глаза.

Создан гетероваризонный GaAlAs-фотоэлемент, спектр относительной квантовой эффективности $\tilde{Q}(h\nu)$ которого практически совпадает со спектром относительной чувствительности глаза $V(h\nu)$ (среднеквадратичное отклонение не превышает 5%), и характерные параметры этих спектров соотносятся следующим образом (в эВ):

	$\tilde{Q}(h\nu)$	$V(h\nu)$
— энергия максимума	2.25	2.25
— полуширина	0.43	0.40
— границы спектра (на уровне $0.5\tilde{Q}_{\max}$)	2.01—2.44	2.04—2.44
— красная граница (на уровне $0.05\tilde{Q}_{\max}$)	1.89	1.88
— фиолетовая граница (на уровне $0.05\tilde{Q}_{\max}$)	2.82	2.75

Абсолютная квантовая эффективность в максимуме спектра $Q_{\max}=0.7$.

1. *Предварительные замечания.* Цель данной работы, продолжающей [1], — создать селективный фотоэлемент, спектр относительной квантовой эффективности которого $\tilde{Q}(h\nu)=Q(h\nu)/Q_{\max}$ был бы максимально приближен к спектру относительной чувствительности глаза $V(h\nu)$ (оптимальный фотоэлемент).

За основу взята гетероваризонная GaAlAs $p-n$ -структура (п. 2); ее упрощенная теоретическая модель рассмотрена в [1], где получена связь спектра $Q(h\nu)$ с параметрами структуры; модель содержит 12 параметров: 4 основных, сильно влияющих на спектр, и 8 неосновных, слабо влияющих на спектр.

Оптимальный фотоэлемент создавался в два этапа.

На первом этапе (п. 3) были изготовлены пробные структуры и путем варьирования значений основных параметров модельной структуры установлена применимость теоретической модели к реальной структуре.

На втором этапе (п. 4) были найдены те значения основных параметров модельной структуры, при которых ее спектр $Q^{\text{mod}}(h\nu)$ слабо отличался от спектра глаза $V(h\nu)$.

Полученные таким образом значения основных параметров и были использованы для изготовления оптимального фотоэлемента.

Смысл ряда используемых в этой статье терминов и обозначений дан в предыдущей работе [1].

2. Изготовление структур. Гетероваризонные GaAlAs $p-n$ -структуры (рис. 1) изготавливались жидкостной эпитаксией. Эпитаксия велась в графитовой cassette поршневого типа из ограниченного объема раствора-расплава высотой 200—400 мкм.

На подложках n -GaAs (100) охлажденном выращивались узкозонный варизонный слой n -GaAlAs, легированный оловом, затем широкозонный слой p -GaAlAs,

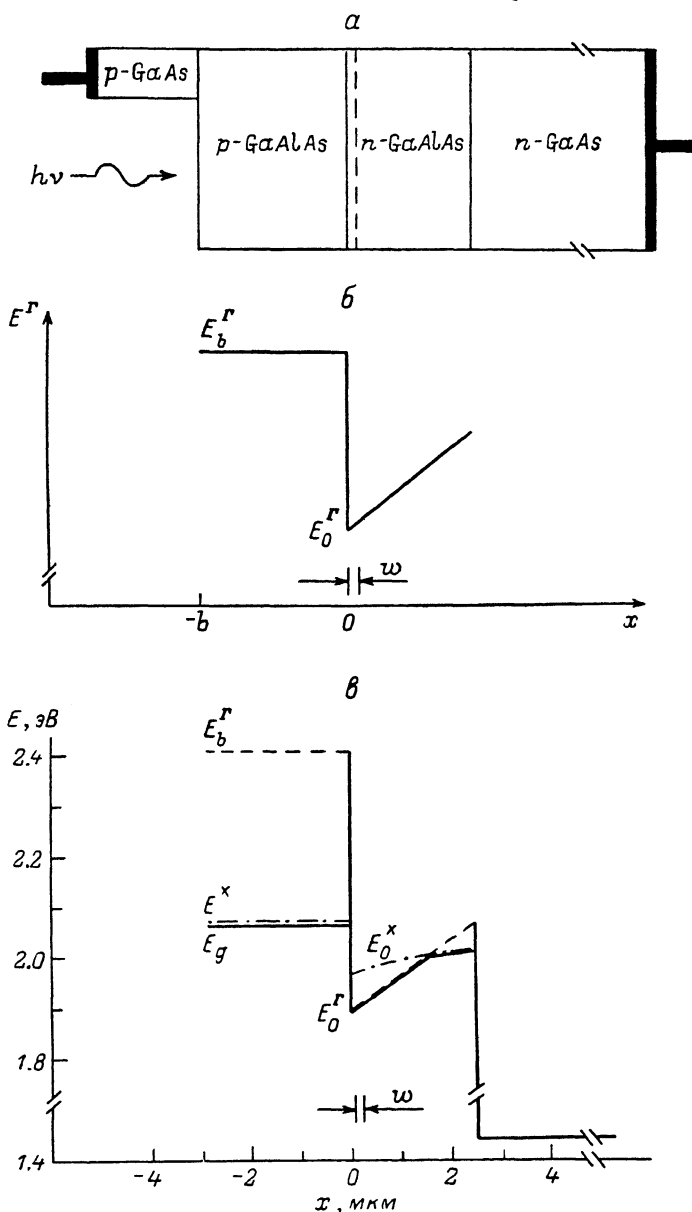


Рис. 1. Структура гетероваризонного GaAlAs-фотоэлемента (а), координатное изменение энергетических порогов в модельной (б) и реальной (в) структурах.

E^r — энергетический порог прямых оптических переходов, E^x — энергетический порог непрямых переходов, E_g — ширина запрещенной зоны. Параметры на в соответствуют оптимальному фотоэлементу С.

легированный цинком, и подконтактный слой p -GaAs, легированный германием. Смена расплава над подложкой производилась вытеснением предыдущего расплава последующим. Чтобы переход от линейной зависимости $E^r(x)$ варизонного слоя к $E^r(x)$ широкозонного слоя был резким, заливаемый раствор-расплава переводился в ненасыщенное состояние подъемом температуры на 0.5—1 °С.

Выбор и задание координатного изменения состава GaAlAs-структур рассматриваются в п. 3.

Толщина варизонного слоя составляла 2—3 мкм, а широкозонного — 3—4 мкм.

p - n -Переход был линейным; слой объемного заряда в равновесии целиком располагался в варизонном слое из-за диффузии цинка в этот слой в процессе эпитаксии и отстоял от гетерограницы на расстоянии не более 0.1 мкм; равновесная ширина слоя объемного заряда $w \approx 0.15$ —0.20 мкм. Концентрация электронов и дырок на границах слоя объемного заряда с квазинейтральными областями была $(1 \div 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Для образования фоточувствительного окна подконтактный слой p -GaAs удалялся селективным травлением, за исключением предназначенной под контакт периферии. Площадь светочувствительного окна была около 5 мм².

Омические контакты создавались сплавлением сплавов индий—олово к n -области и индий—цинк к p -области.

Для уменьшения отражения света от широкозонной поверхности на нее наносилось анодированием просветляющее покрытие, которое снижало коэффициент отражения до $\sim 5\%$ в максимуме фоточувствительности и до 15—20% по краям видимого диапазона.

Спектры относительной квантовой эффективности фотоэлемента $\bar{Q}^{\text{exp}}(h\nu) \sim \sim I_{sc}$, где I_{sc} — фототок короткого замыкания, снимались при равном числе падающих фотонов разной энергии, которое задавалось с погрешностью не более 5%; разрешение по энергиям фотонов — не хуже 0.02 эВ. Абсолютная квантовая эффективность в максимуме Q_{max} определялась с погрешностью не более 10%.

Спектры относительной квантовой эффективности $\bar{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ структуры без отражающего покрытия и с покрытием совпадали в пределах погрешности измерений.

3. *Пробные структуры и применимость модели.* Для выяснения применимости теоретической модели [1] к реальной структуре были изготовлены пробные GaAlAs p - n -структуры.

Значения пороговой энергии прямых оптических переходов варизонного слоя на гетерогранице E_0^r и широкозонного слоя на освещаемой поверхности E_b^r пробных структур (рис. 1) задавались такими, чтобы спектральный интервал фоточувствительности этих структур хотя бы грубо соответствовал спектральному интервалу чувствительности глаза (спектр глаза представлен на рис. 1 [1]). Поскольку значения E_0^r не должны быть меньше $h\nu_r$ — красной границы спектра глаза и больше $h\nu_r^{\Delta}$ — длинноволновой границы на уровне полуширины, то они выбирались из интервала $h\nu_r \leq E_0^r \leq h\nu_r^{\Delta}$ ($1.8 \leq E_0^r \leq 2.0$ эВ). Так как значения E_b^r не должны быть меньше $h\nu_m$ — энергии максимума спектра глаза и больше $h\nu_b^{\Delta}$ — коротковолновой границы на уровне полуширины, то они выбирались из интервала $h\nu_m \leq E_b^r \leq h\nu_b^{\Delta}$ ($2.3 \leq E_b^r \leq 2.5$ эВ).

Пробные структуры различались главным образом основными параметрами, которые задавались в процессе их выращивания:

— энергетические параметры E_0^r и E_b^r — непосредственно составом твердого раствора с погрешностью около 2%;

— параметр $\tau_{ob} = \alpha_{op} b$ (оптическая толщина широкозонного слоя при $h\nu = E_b^r$) — толщиной широкозонного слоя b , задаваемой температурным интервалом охлаждения раствора-расплава; слой выращивался такой толщины b , чтобы $\tau_{ob} \approx 1$ (см. рис. 3, г [1]), что соответствует $b \approx 3$ мкм, если считать $\alpha_{op} \approx \approx 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [2];

— параметр варизонности $\gamma = |\nabla E^r| / \alpha_{on} \epsilon_{on}$ — градиентом пороговой энергии прямых переходов ∇E^r , задаваемым высотой расплава и содержанием в нем олова [3] с погрешностью 10%; варизонная область выращивалась с таким $|\nabla E^r|$, чтобы параметр γ попадал в интервал 5—15 (см. рис. 3, б [1]), т. е. интервал $|\nabla E^r| = 400$ —700 эВ/см для разных структур, так как $\alpha_{on} = 3 \times 10^3 \text{ см}^{-1}$ [2], а $\epsilon_{on} = 0.02$ —0.03 эВ (способ нахождения ϵ_{on} дан далее).

Подчеркнем, что в отличие от энергетических параметров E_0^r и E_b^r , значения которых задавались непосредственно и с достаточной точностью, комбинируван-

ные параметры τ_{ob} и γ исходно были известны недостаточной точно из-за приближительного задания значений α_{0n} , α_{0p} и ϵ_{0n} .

Из всех пробных структур будем рассматривать структуры *A* и *B*, которые имели следующие задаваемые технологией параметры:

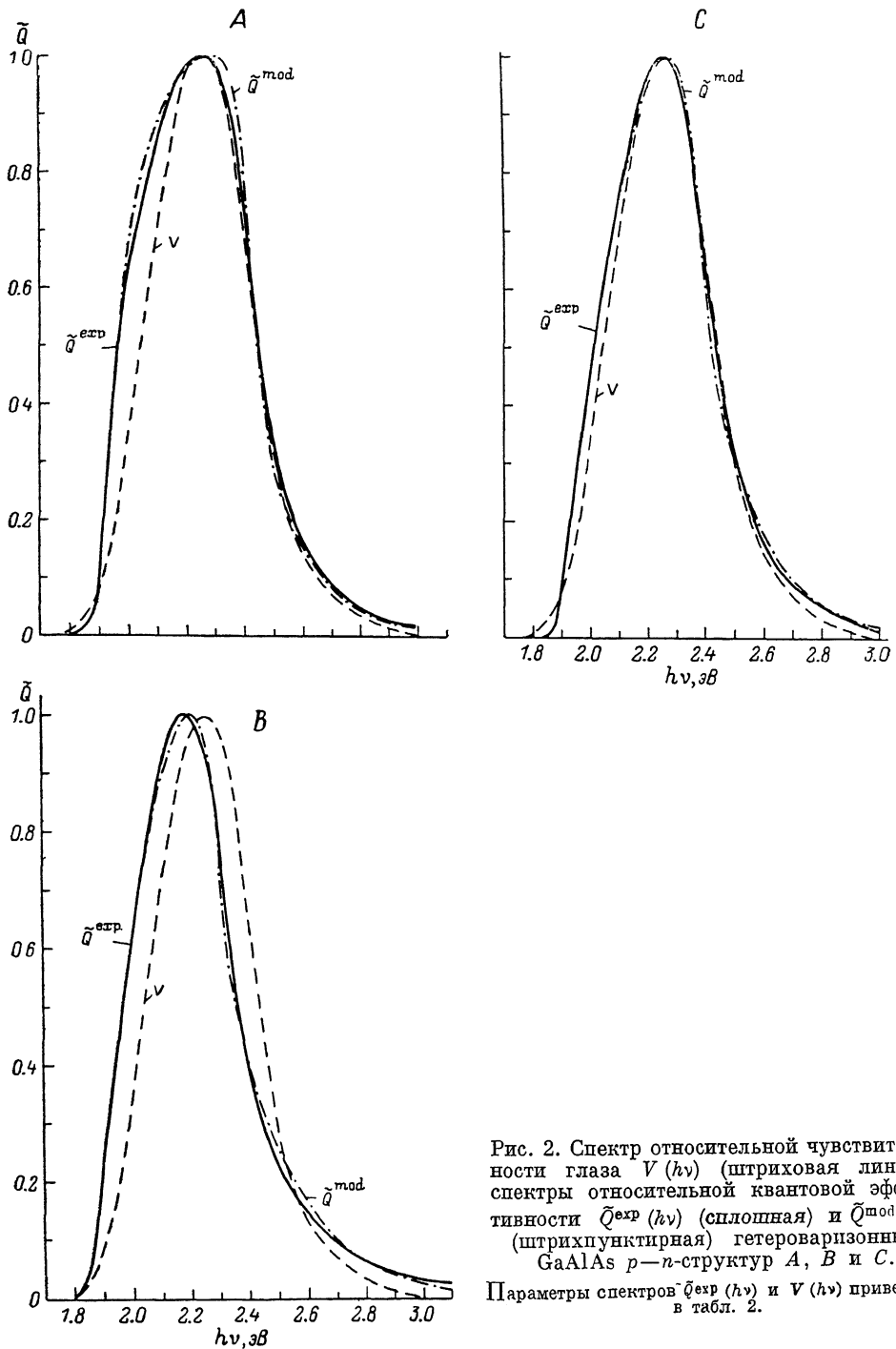


Рис. 2. Спектр относительной чувствительности глаза $V(h\nu)$ (штриховая линия), спектры относительной квантовой эффективности $\tilde{Q}^{exp}(h\nu)$ (сплошная) и $\tilde{Q}^{mod}(h\nu)$ (штрихпунктирная) гетероэваризонных GaAlAs $p-n$ -структур *A*, *B* и *C*.

Параметры спектров $\tilde{Q}^{exp}(h\nu)$ и $V(h\nu)$ приведены в табл. 2.

- пороговые энергии $E_0^\Gamma = 1.91 \pm 0.02$ (A) и 1.89 ± 0.02 эВ (B);
- градиенты пороговой энергии $|\nabla E^\Gamma| = 400 \pm 40$ (A) и 700 ± 70 эВ/см (B);
- пороговые энергии $E_b^\Gamma = 2.47 \pm 0.04$ (A) и 2.33 ± 0.04 эВ (B);
- толщины $b = 3.5 \pm 0.5$ (A) и 3.0 ± 0.5 мкм (B).

Таблица 1

	Структура								
	A		A*	B		B*	C		C*
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Основные параметры									
E_0^r , эВ	1.91	1.92	1.94	1.89	1.87	1.93	1.91	1.90	1.92
E_b^r , эВ	2.47	2.47	2.45	2.32	2.33	2.42	2.43	2.41	2.42
τ_{ob}	1	1.3	1.3	1	0.75	0.95	1	0.90	0.95
γ	—	5	9	—	12	13	—	16	15
Отклонения									
$\sigma_{\min}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - \tilde{Q}^{\text{exp}})$		0.025			0.018			0.019	
$\sigma_{\min}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - V)$			0.028			0.026			0.026
$\sigma(\tilde{Q}^{\text{exp}} - V)$	0.1			0.14			0.045		

Примечание. I — исходные параметры, задаваемые при выращивании структур; II и III — параметры, соответствующие максимальной приближенности спектра $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ к спектрам $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ (II) и $V(h\nu)$ (III).

Исходные основные параметры структур A и B представлены в табл. 1 (колонки I), а измеренные спектры относительной квантовой эффективности $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ — на рис. 2 и в табл. 2.

Применимость теоретической модели к реальной структуре устанавливалась следующим образом.

Теоретический спектр модельной структуры $Q^{\text{mod}}(h\nu)$ [1] приближался к экспериментальному спектру пробной структуры $Q^{\text{exp}}(h\nu)$ путем варьирования на ЭВМ основных параметров модельной структуры.

Таблица 2

Параметры спектров $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ и $V(h\nu)$, эВ	Структура			Глаз	
	A	B	C		
Энергия максимума	$h\nu_m$	2.25	2.18	2.25	2.25
Полуширина	Δ	0.49	0.40	0.43	0.40
Длинноволновая граница (на уровне $0.5\tilde{Q}_{\text{max}}$)	$h\nu_r^A$	1.97	1.97	2.02	2.05
Коротковолновая граница (на уровне $0.5\tilde{Q}_{\text{max}}$)	$h\nu_v^A$	2.46	2.37	2.44	2.44
Красная граница (на уровне $0.05\tilde{Q}_{\text{max}}$)	$h\nu_r$	1.90	1.86	1.89	1.88
Фиолетовая граница (на уровне $0.05\tilde{Q}_{\text{max}}$)	$h\nu_v$	2.80	2.88	2.82	2.75
Q_{max} , абс. ед.		0.8	0.7	0.7	—

Для каждого набора значений основных параметров модельной структуры определялось среднеквадратичное отклонение спектра относительной квантовой эффективности модели $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ от спектра относительной квантовой эффективности пробной структуры $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$:

$$\sigma(E_0^r, E_b^r, \tau_{ob}, \gamma, \dots) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu_i) - \tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu_i)]^2 / N}, \quad (1)$$

где N — число точек сравнения, и находилось минимальное значение $\sigma = \sigma_{\min}$.

Для приближения $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ к $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ предварительно необходимо было задать неосновные параметры пробной структуры, которые, как правило, не варьировались, поскольку они слабо влияют на спектр. Значения этих параметров брались либо из спектра $Q^{\text{exp}}(h\nu)$ после его обработки, либо из литературы:

- параметр ε_{0n} определялся из асимптоты длинноволнового хвоста спектра $Q^{\text{exp}}(h\nu)$ (по формуле (9) [1]) и оказался равным 0.028 (А) и 0.021 эВ (В);
- параметр $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_{0n}/2kT$ равен 0.56 (А) и 0.42 (В) при $kT = 0.025$ эВ;
- параметры ε_{1n} и ε_{0p} были взяты из [4]: $\varepsilon_{1n} = 0.2$ и $\varepsilon_{0p} = 0.05$ эВ для всех структур;
- параметр ε_{1p} определялся из асимптоты коротковолнового хвоста спектра $Q^{\text{exp}}(h\nu)$ (по формуле (10) [1]) и оказался равным 0.17 (А) и 0.14 эВ (В);
- параметр Λ_p (безразмерная диффузионная длина дырок), влияющий в основном на величину Q_{max} , находился из условия $Q_{\text{max}}^{\text{mod}} \approx Q_{\text{max}}^{\text{exp}}$ и был принят равным 0.5 ($L_p = 1.6$ мкм) (А) и 1 ($L_p = 3.3$ мкм) (В);
- параметр Λ_n (безразмерная длина электронов), влияющий в основном только на асимптоту коротковолнового хвоста спектра и практически не влияющий на главную часть спектра, оказалось достаточным положить равным 0.1 ($L_n = 0.3$ мкм) для всех структур;
- параметр $W = \alpha_{0n} w$ (безразмерная ширина слоя объемного заряда) брался равным 0.06 ($w = 0.2$ мкм, $\alpha_{0n} = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [2]) для всех структур.

Результаты приближения спектра $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ к спектру $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ представлены на рис. 2, в колонках II табл. 1 и сводятся к следующему:

- максимально приближенный к $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ спектр $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ практически совпадает со спектром $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ (рис. 2): $\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - \tilde{Q}^{\text{exp}}) \leq 0.03$ (колонки II);
- значения пороговых энергий структуры, соответствующие максимальной приближенности спектров (колонки II), совпадают с исходными (колонки I);
- найденное τ_{0b} (колонки II) и известное b дают $\alpha_{0p} = (2 \div 4) \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$, что согласуется с α_{0p} , взятым из [2];
- найденное γ (колонки II) при $\varepsilon_{0n} = 0.028$ (А) и 0.021 эВ (В) и $\alpha_{0n} = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ [2] дают $|\nabla E^{\Gamma}| = 420$ (А) и 760 эВ/см (В), что совпадает с исходными значениями в пределах точности их задания.

Итак, совпадение $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ с $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ происходит при таких значениях основных параметров модельной структуры, которые близки к исходным, заданным при выращивании структуры. На этом основании мы делаем вывод о применимости теоретической модели [1] к реальной структуре.

Отметим, что главное отличие реальной структуры от модельной (рис. 1) — непрямоzonность некоторых ее частей — не приводит к осложнениям. Непрямоzonность дальней части варизонного слоя [ответственного за формирование длинноволнового крыла спектра ($h\nu < h\nu_m$)] несущественна, поскольку из-за ее удаленности главный вклад в квантовую эффективность дает прямоzonная часть. Непрямоzonность широкозонного слоя [ответственного за формирование коротковолнового крыла спектра ($h\nu > h\nu_m$)] учтена тем, что при $h\nu < E_g^{\text{I}}$ коэффициент поглощения в этом слое $\alpha_{vp} \neq 0$.

4. *Оптимизация и оптимальный фотоэлемент.* Для перехода к оптимальному фотоэлементу сравним экспериментальные спектры $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ пробных структур со спектром чувствительности глаза $V(h\nu)$. Количественной характеристикой сравнения служит среднеквадратичное отклонение σ , определяемое по формуле (1), в которой $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ заменен на $V(h\nu)$.

Из этого сравнения следует, что спектры $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ пробных структур А и В сильно отличаются от спектра $V(h\nu)$ (рис. 2): $\sigma = 0.1$ (А) и 0.14 (В) (колонки I табл. 1).

Введем в рассмотрение гипотетические структуры А* и В* с теми же значениями неосновных параметров, что и у структур А и В соответственно, и выясним, какими должны быть основные параметры структур А* и В*, чтобы их спектры были максимально приближены к спектру $V(h\nu)$, т. е. проведем оптимизацию структур А и В относительно спектра глаза. Эта процедура отличается от процедуры приближения (п. 3) тем, что в формуле (1) $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ заменяется на $V(h\nu)$.

Результаты оптимизации структур А и В относительно глаза, приводящей к структурам А* и В*, сводятся к следующему:

- максимально приближенный к $V(h\nu)$ спектр $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ практически совпадает со спектром $V(h\nu)$ (поэтому он на рис. 2 не представлен): $\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - V) \leq \leq 0.03$ для обеих структур (колонки III табл. 1);

— значения основных параметров структуры A^* и B^* , соответствующие максимальной приближенности спектров (колонки III), по-разному отличаются от параметров пробных структур A и B (колонки II); так, малое отклонение $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ от $V(h\nu)$ достигается в структуре A^* в основном за счет увеличения параметра варизонности γ по сравнению с пробной структурой A , а в структуре B^* — в основном за счет увеличения пороговых энергий E_0^r и E_b^r по сравнению с пробной структурой B (ср. колонки III с II).

Поскольку $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ гипотетических структур A^* и B^* слабо отличаются от спектра $V(h\nu)$ [$\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - V) \leq 3\%$], то обе они могут быть основой для создания оптимального фотозлемента.

Реальной практически оптимальной является структура C , при изготовлении которой мы стремились к тому, чтобы ее параметры совпадали с параметрами структуры B^* .

Значения заданных технологией основных параметров структуры C приведены в колонке I табл. 1, а спектр $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ — на рис. 2. Значения неосновных параметров структуры не отличались от параметров структуры B , кроме ε_{0n} (после уточнения $\varepsilon_{0n} = 0.019$ эВ и соответственно $\tilde{\varepsilon} = 0.38$).

При определении параметров структуры, основанном на максимальном приближении спектра $\tilde{Q}^{\text{mod}}(h\nu)$ к спектру $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ [$\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - \tilde{Q}^{\text{exp}}) = 0.019$], получены значения основных параметров, близкие к исходно заданным технологией (ср. колонки II и I).

Сравнение спектров $\tilde{Q}^{\text{exp}}(h\nu)$ структур C и B (рис. 2) со спектром $V(h\nu)$ показывает, что спектр структуры C существенно ближе к спектру $V(h\nu)$, чем структуры B : $\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{exp}} - V) = 0.14$ (B) и 0.045 (C) (колонки I табл. 1).

Отметим, что при дальнейшем приближении структуры C к глазу получается структура C^* (колонка III табл. 1), для которой $\sigma_{\text{min}}(\tilde{Q}^{\text{mod}} - V) = 0.026$ в отличие от 0.045 для структуры C ; однако разница между параметрами структур C и C^* становится для технологии трудно уловимой (ср. колонку II с колонкой III).

5. *Заключение.* Создан фотозлемент, являющийся спектральным аналогом человеческого глаза.

Основой фотозлемента служит гетероваризонная GaAlAs p - n -структура (рис. 1).

Спектральная характеристика фотозлемента достаточно хорошо описывается теоретической моделью [1].

Спектр относительной квантовой эффективности этого фотозлемента при комнатной температуре практически совпадает со спектром относительной чувствительности глаза (их среднеквадратичное отклонение не превышает 5%). Абсолютная квантовая эффективность в максимуме спектра равна 0.7.

Характерные параметры структуры фотозлемента:

— пороговая энергия прямых оптических переходов варизонного слоя на гетерогранице $E_0^r = 1.90$ эВ;

— градиент ширины запрещенной зоны в варизонном слое $|\nabla E_g| = |\nabla E^r| \approx \approx 700$ эВ/см;

— пороговая энергия прямых оптических переходов на освещаемой широкозонной поверхности $E_b^r = 2.41$ эВ;

— толщина широкозонного слоя ≈ 3.5 мкм.

Авторы благодарны О. В. Константинову и В. Е. Челнокову за обсуждение результатов этой работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Резников Б. И., Стамкулов А. А., Таурбаев Т. И., Царенков Б. В., Царенков Г. В. — ФТП, 1988, т. 22, в. 9, с. 1634—1639.
- [2] Морозов Б. М., Болховитянов Ю. Б., Габараев Р. С., Кравченко А. Ф., Юдаев В. И. — ФТП, 1980, т. 14, в. 8, с. 1486—1491.
- [3] Panish M. B. — J. Appl. Phys., 1973, v. 44, N 6, p. 2667—2675.
- [4] Monemar B., Schi K. K., Pettit G. D. — J. Appl. Phys., 1976, v. 47, N 6, p. 2604—2613.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 29.10.1987
Принята к печати 1.04.1988