

Осцилляции наведенного фотоплетохроизма в гетеропереходах ZnO/GaAs

© С.Е. Никитин, Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь[¶], Е.И. Теруков, N. Fernelius[†], J. Goldstein[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

[†] Air Force Wright Lab., Wright Patterson AFB, OH, USA

(Получена 14 июля 2003 г. Принята к печати 16 июля 2003 г.)

Методом магнетронного осаждения тонких пленок n -ZnO:Al на поверхность эпитаксиальных слоев n - и p -GaAs получены анизотипные и изотипные гетеропереходы ZnO/GaAs. Показано, что в широкой спектральной области 1.5–3.2 эВ полученные гетероструктуры обладают высокой фоточувствительностью ($\sim 5 \cdot 10^3$ В/Вт при 300 К), которая осциллирует вследствие интерференции излучения в тонкопленочной компоненте. При наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность пленок ZnO в гетеропереходе возникает наведенный фотоплетохроизм, величина которого осциллирует в пределах ~ 1 –55% при $\theta = 85^\circ$, что также связано с интерференцией излучения в пленке ZnO. Сделан вывод о перспективности применения полученных гетеропереходов в качестве узкоселективных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения.

Обнаружение наведенного фотоплетохроизма в изотропных алмазоподобных полупроводниках, возникающего при наклонном падении линейно поляризованного излучения, открыло реальные пути применения кубических полупроводников $A^{III}B^V$ в фотозлектронике нового поколения [1,2]. Уже первые исследования этого явления в кристаллах $A^{III}B^V$ показали возможность создания поляриметрических фотодетекторов с рекордной поляризационной эффективностью фотопреобразования ~ 0.22 А/Вт·град [3–6]. В последнее время все более широкое применение в полупроводниковой оптоэлектронике находят широкозонные оксиды, обладающие высокой проводимостью и высокой оптической прозрачностью, что, в частности, позволяет достигать значительной квантовой эффективности солнечных элементов [7–10]. В настоящей работе представлены результаты первых исследований поляризационной фоточувствительности гетеропереходов (ГП), включающих GaAs и тонкие слои ZnO.

Гетероструктуры создавались осаждением пленок ZnO:Al методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере аргона прессованной мишени ZnO:Al. В качестве подложек применялись эпитаксиальные слои p -GaAs:Mn с концентрацией дырок $p \approx 10^{17}$ см⁻³ и n -GaAs с концентрацией электронов $n \approx 10^{13}$ см⁻³ при температуре $T = 300$ К, выращенные на полуизолирующих подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (100). Для легирования ZnO в состав мишени вводился алюминий [10], что обеспечивало получение пленок n -ZnO:Al с концентрацией электронов $n \approx 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ при $T = 300$ К. Пленки имели высокую адгезию по отношению к эпитаксиальной поверхности GaAs.

Измерения стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) $I(U)$ показали, что как в анизотипных ГП n -ZnO:Al/ p -GaAs:Mn, так в изотипных n -ZnO:Al/ n -GaAs наблюдается выпрямление. При этом пропускному направлению всегда отвечает отрицательная полярность внешнего напряжения смещения на пленке n -ZnO:Al, что находится в соответствии с приближенной энергетической диаграммой изучаемых гетеропереходов. В качестве примера на рис. 1 приведена типичная ВАХ одного из анизотипных ГП. В области напряжений $U < 0.3$ В происходит экспоненциальное возрастание прямого тока, которому соответствует ди-

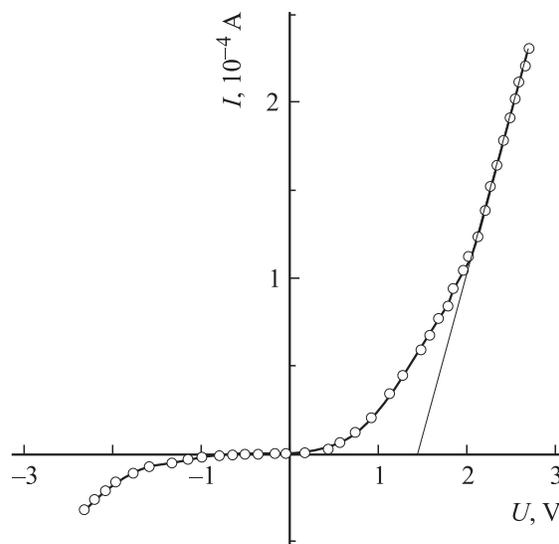


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика гетероперехода n -ZnO:Al/ p -GaAs:Mn при $T = 300$ К. Пропускное направление отвечает положительной полярности внешнего смещения на p -GaAs:Mn.

[¶] E-mail: yuryrud@mail.ioffe.ru

одный показатель (коэффициент неидеальности) ~ 2.4 . Это позволяет высказать предположение о том, что прямой ток определяется рекомбинационными процессами в активной области полученных структур [11]. При $U > 2$ В, как видно из рис. 1, прямая ветвь ВАХ следует соотношению

$$I = (U - U_0)/R_0, \quad (1)$$

где остаточное сопротивление $R_0 \approx 10^4$ Ом, а напряженные отсечки $U_0 \approx 1.4$ В, что близко к ширине запрещенной зоны E_G арсенида галлия [12]. Обратный ток в анизотипных ГП обычно следует степенному закону $I \propto U^\gamma$, где $\gamma \approx 1.1$ в области $U \lesssim 0.3$ В, а с дальнейшим увеличением напряжения в диапазоне 0.5–2.5 В γ достигает ~ 3 . Характер обратных ВАХ позволяет высказать предположение о несовершенстве периферии полученных анизотипных ГП, коэффициент выпрямления в которых, представляющий собой отношение прямого тока к обратному, составляет $K \approx 10$ (при $U \approx 1.5$ В). В случае изотипных ГП величина остаточного сопротивления структур возрастает до $R_0 \approx 10^8$ Ом, что определяется низким уровнем легирования слоев n -GaAs. Обратные токи в этих ГП составляют $\sim 10^{-8}$ А при $U = 10$ В и $T = 300$ К.

Фотовольтаический эффект в полученных n - p - и n - n -гетеропереходах оказывается большим при их освещении со стороны пленки n -ZnO:Al. Для лучших анизотипных ГП максимальная вольтовая фоточувствительность достигает $S_V^m \approx 500$ В/Вт, а токовая $S_I^m \approx 0.5$ мА/Вт при $T = 300$ К. В случае изотипных гетеропереходов $S_V^m \approx 5 \cdot 10^3$ В/Вт. Эти параметры хорошо воспроизводимы и не обнаруживают каких-либо деградационных явлений. Следует также подчеркнуть, что знак фототока в полученных ГП не зависит: а) от места локализации светового зонда (диаметр ~ 0.2 мм) при его смещении вдоль поверхности, б) от энергии падающих фотонов $\hbar\omega$ и в) от интенсивности излучения. Это позволяет связывать наблюдаемую фоточувствительность ГП с единственной активной областью, возникающей на гетерогранице.

Типичная для полученных ГП спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ при освещении со стороны пленки n -ZnO приведена на рис. 2. Следует подчеркнуть, что характер спектров $\eta(\hbar\omega)$ оказался одинаковым как для анизотипных, так и для изотипных гетеропереходов. Основные закономерности спектров фоточувствительности ГП ZnO/GaAs следующие.

Длинноволновый край η имеет экспоненциальный вид и характеризуется большой крутизной $S = \delta(\ln \eta)/\delta(\hbar\omega) \approx 80\text{--}90$ эВ $^{-1}$, что характерно для прямозонных алмазоподобных полупроводников [12]. Излом в области перехода от экспоненциальной зависимости на кривых $\eta(\hbar\omega)$ к более слабой во всех полученных n - p - и n - n -гетеропереходах локализован при одной и той же энергии $\hbar\omega_0 \approx 1.415$ эВ, что согласуется с шириной запрещенной зоны арсенида галлия [12]. Из рис. 2

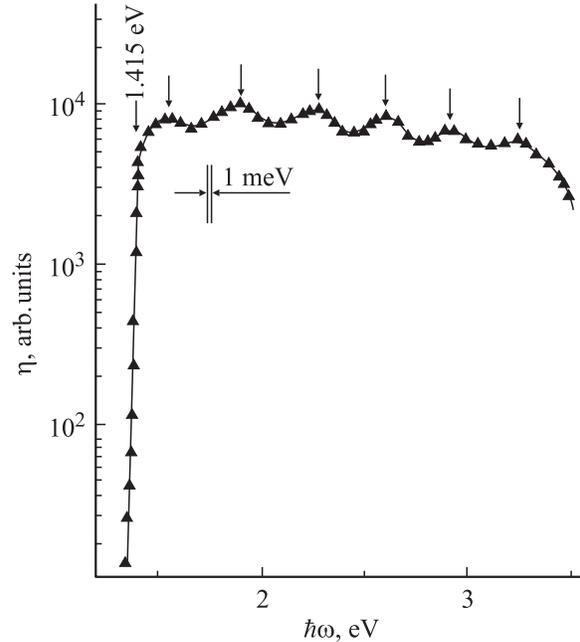


Рис. 2. Спектральная зависимость относительной квантовой эффективности фотопреобразования гетероперехода n -ZnO:Al/ p -GaAs:Mn в неполяризованном излучении при $T = 300$ К. Образец 2, освещение со стороны пленки n -ZnO:Al.

также следует, что при $\hbar\omega > E_G$ фоточувствительность достигает максимального значения и сохраняется на высоком уровне при увеличении $\hbar\omega$. Коротковолновый спад η происходит, как правило, при $\hbar\omega > 3.2\text{--}3.4$ эВ, что близко к ширине запрещенной зоны тонкопленочной компоненты ГП ZnO [12–14]. Следовательно, в полученных ГП проявляется типичный для идеальных гетеропереходов эффект окна по отношению к интенсивности падающему излучению, в результате чего фоточувствительность сохраняется на высоком уровне в зазоре между ширинами запрещенных зон компонент ГП. При этом следует иметь в виду, что набор функциональных параметров контактирующих веществ не соответствует требованиям для получения идеального сопряжения. По-видимому, проявление эффекта окна может быть связано с тем, что тонкая пленка ZnO „подстраивается“ под толстую подложку GaAs. В этой связи можно полагать, что концентрация дефектов рассогласования на гетерогранице полученных ГП достаточно низкая и рекомбинация на интерфейсе практически не проявляется.

К числу главных закономерностей, которые проявились в фоточувствительности полученных ГП, следует отнести наблюдение осцилляций в спектрах $\eta(\hbar\omega)$ при освещении структур неполяризованным излучением (рис. 2). Если эти осцилляции характеризовать отношением квантовой эффективности фотопреобразования в максимуме к эффективности в минимуме $\Delta = \eta^{\max}/\eta^{\min}$, то для полученных ГП Δ лежит в диапазоне 1.2–1.4, причем более высокие значения Δ обнаруживаются в

анизотипных ГП, а с ростом $\hbar\omega$ также происходит понижение величины Δ . Очевидно, что для объяснения этих фактов требуются дополнительные исследования, тогда как наличие осцилляций в спектрах $\eta(\hbar\omega)$ свидетельствует о гомогенности пленок ZnO.

Спектральные положения максимумов и минимумов η различаются в ГП из разных партий, что отражает влияние параметров процесса осаждения на получаемые пленки n -ZnO:Al. Из спектров $\eta(\hbar\omega)$, согласно выражению для показателя преломления [15]

$$n = \lambda_m \lambda_{m-1} / 2d(\lambda_m - \lambda_{m-1}), \quad (2)$$

где λ_m — длина волны неполяризованного излучения при η^{\max} , а m — номер максимума, с применением $n = 2$ для ZnO [12], оценивалась толщина пленок. Она составляет $d \approx 0.7$ – 0.9 мкм, что удовлетворительно соответствует результатам прямых измерений толщин пленок ZnO:Al.

Полная ширина спектров fotocувствительности как анизотипных, так и изотипных ГП $\delta \approx 1.85$ – 2.0 эВ характеризует полученные структуры как широкополосные фотопреобразователи неполяризованного излучения с возможностью использования тонкой структуры для обеспечения спектральной перестройки их fotocувствительности.

Проведенные исследования показали, что поляризационная fotocувствительность в полученных ГП возникает только в условиях наклонного падения линейно поляризованного излучения на наружную зеркальную поверхность тонкопленочной компоненты структур, что дает основания сделать вывод о проявлении наведенного фотоплетохроизма [1,2]. При фиксированных углах падения излучения $\theta > 0^\circ$ фототок короткого замыкания ГП обнаруживает периодическую зависимость от азимутального угла φ между вектором электрического поля световой волны \mathbf{E} и плоскостью падения излучения (PIR) [1,2]:

$$i = i^p \cos^2 \varphi + i^s \sin^2 \varphi, \quad (3)$$

где i^p и i^s — фототок в поляризациях $\mathbf{E} \parallel \text{PIR}$ и $\mathbf{E} \perp \text{PIR}$ соответственно.

В условиях наклонного падения линейно поляризованного излучения на приемную поверхность ГП ZnO/GaAs происходит трансформация спектров $\eta(\hbar\omega)$, которая определяется положением вектора \mathbf{E} относительно плоскости падения излучения (рис. 3, кривые 1 и 2). При этом длинноволновый край η остается экспоненциальным, а величина $\hbar\omega_0$ оказывается практически одинаковой для s - и p -поляризаций излучения, $\hbar\omega_0 = 1.415$ эВ. Последнее связано с тем, что кристалл GaAs не испытывает каких-либо возмущений, вызывающих изменение E_G . С ростом $\hbar\omega > E_G$ поляризация излучения сильно влияет как на величину, так и на характер спектра fotocувствительности. Максимумам η^p отвечают минимумы η^s , а минимумам η^p — максимумы η^s . В результате при фиксированном угле падения излучения в спектрах квантовой эффективности четко

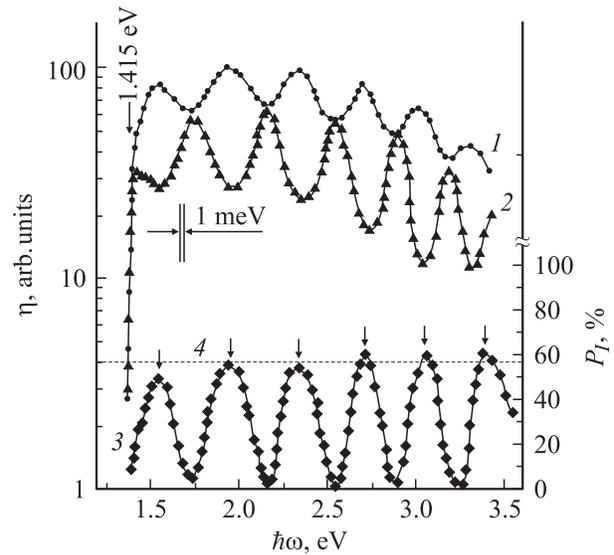


Рис. 3. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотообразования для p -поляризации η^p (1), s -поляризации η^s (2) и коэффициента наведенного фотоплетохроизма P_I (3) гетероперехода n -ZnO:Al/ p -GaAs:Mn при $T = 300$ К. $\theta = 85^\circ$. 4 — расчет P_I для границы воздух/ZnO согласно [16].

выделяются энергии фотонов, при которых значения η^p и η^s максимально „расходятся“ или же максимально „сближаются“, так что $\eta^p \approx \eta^s$. Согласно [2], эти закономерности свидетельствуют о проявлении интерференции во входном окне полученных ГП (пленка ZnO).

На рис. 3 представлена также экспериментальная спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплетохроизма ГП ZnO/GaAs при $\theta \approx 85^\circ$ (кривая 3), определенного согласно соотношению [2]

$$P_I = (\eta^p - \eta^s) / (\eta^p + \eta^s). \quad (4)$$

Видно, что при энергиях фотонов $\hbar\omega \approx 1.55, 1.95, 2.34, 2.71, 3.05$ и 3.34 эВ, отвечающих максимальной „расходимости“ значений квантовой эффективности для p - и s -поляризаций, реализуются максимумы в спектре $P_I(\hbar\omega)$ (рис. 3, кривая 3). Следует подчеркнуть, что эти максимальные экспериментальные значения P_I^{\max} близки к теоретической оценке коэффициента наведенного фотоплетохроизма (рис. 3, кривая 4), сделанной на основании [2,16]. Как следует из рис. 3 (кривая 4), рассчитанный согласно [16] коэффициент P_I от энергии фотонов практически не зависит. Это связано с учетом в [16] интерференции излучения. В результате интерференционных явлений в экспериментальном спектре $P_I(\hbar\omega)$ для полученных ГП наблюдаются четкие минимумы, в которых значения P_I^{\min} приближаются к нулю в результате достижения просветления одновременно для p - и s -поляризации, тогда как энергии фотонов $\hbar\omega \approx 1.75, 2.16, 2.55, 2.88$ и 3.34 эВ соответствуют условию исчезновения наведенного фотоплетохроизма ($P_I^{\min} \rightarrow 0$).

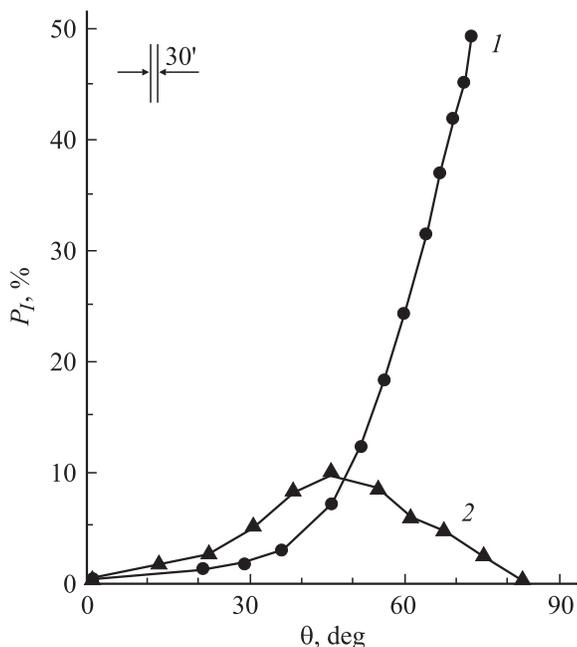


Рис. 4. Зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма от угла падения линейно поляризованного излучения θ в области интерференционных максимума (1) и минимума (2) для гетероперехода $n\text{-ZnO:Al}/p\text{-GaAs:Mn}$ при $T = 300\text{ K}$. Освещение со стороны пленки $n\text{-ZnO:Al}$.

На рис. 4 приведены типичные примеры экспериментальных зависимостей коэффициента наведенного фотоплекроизма от угла падения излучения в окрестности максимума (кривая 1) и минимума (кривая 2) P_I . Видно, что в области максимумов в спектре $P_I(\hbar\omega)$ зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма от угла падения находится в соответствии с теорией [16] и подчиняется параболическому закону

$$P_I \propto \theta^2, \quad (5)$$

причем величина P_I соответствует показателю преломления ZnO [12]. При переходе в область минимумов в спектре $P_I(\hbar\omega)$ экспериментальная зависимость $P_I(\theta)$ (рис. 4, кривая 2) уже не соответствует выражению (5), а экспериментальная величина коэффициента P_I сильно спадает по отношению к ожидаемой из теории [16]. Это отличие вызвано интерференцией излучения p - и s -поляризаций в тонкопленочной компоненте ГП и, согласно [2], указывает на достаточно высокое интерференционное просветление ГП пленкой ZnO:Al, если выполняется условие $P_I \rightarrow 0$.

Следует отметить, что наблюдение близких к теоретической оценке значений коэффициента P_I^{\max} в ГП ZnO/GaAs (рис. 3, кривая 3) дает основание сделать вывод о возможностях применения таких ГП в качестве селективных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения, перестройка спектрального диапазона и величины коэффициента P_I в которых осуществляется

углом падения и режимом нанесения пленок ZnO. Обнаруженное явление исчезновения наведенного фотоплекроизма ($P_I \rightarrow 0$) может быть использовано в мониторинге просветления ГП, включающих тонкопленочную компоненту.

Следовательно, метод магнетронного распыления мишени ZnO:Al позволяет наносить на поверхности монокристаллов арсенида галлия тонкие ($\sim 1\text{ мкм}$) пленки ZnO и создавать гетеропереходы, обнаруживающие осцилляции в спектре наведенного фотоплекроизма в интервале от 55 до 1–2% в области высокой квантовой эффективности фотообразования в диапазоне от 1.5 до 3.2 эВ, что открывает возможность применения гетеропереходов на основе арсенида галлия в оптоэлектронике нового поколения.

Список литературы

- [1] Ю.В. Рудь. Изв. вузов СССР. Физика, **29**, 68 (1986).
- [2] Ф.П. Кесаманлы, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Г.В. Шок. ФТП, **33**, 513 (1999).
- [3] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. Письма ЖТФ, **18** (12), 38 (1992).
- [4] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, А. Беркелиев, М.Г. Дурдымурадова, О.В. Корнякова. Письма ЖТФ, **19** (4), 57 (1993).
- [5] С.Г. Конников, Г.Д. Мелебаева, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. Письма ЖТФ, **18** (24), 32 (1992).
- [6] S.G. Konnikov, D. Melebaev, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', A. Berkeliev, M. Serginov, S. Tilevov. Jap. J. Appl. Phys., **32** (3), 515 (1993).
- [7] N. Mardeesich. In: Proc 15th IEEE Photovoltaic Spec. Conf. (Kissimee, 1981) [IEEE El. Dev. Lett., № 4, 446 (1981)].
- [8] Ю.А. Николаев, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков, W. Fuhs, A. Froitzheim. ФТП, **36**, 1128 (2002).
- [9] С.Е. Никитин, Ю.А. Николаев, И.К. Полушина, В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь, Е.И. Теруков. ФТП, **37** (11), 1329 (2003).
- [10] E. Aperathirtis, Z. Hatzpoulos, M. Androulidaki, V. Foukaraki, A. Kondilis, C.G. Scott, D. Sands, P. Panayotatos. Sol. Energy Mater. Solar Cells, **45**, 161 (1997).
- [11] S.M. Sze. *Physics of Semiconductors Devices* (N.Y., Wiley Interscience Publ., 1981).
- [12] *Физико-химические свойства полупроводниковых веществ*. Справочник, под ред. А.В. Новоселовой. (М., Наука, 1979).
- [13] A. Shileika. Surf. Sci., **37**, 730 (1973).
- [14] H. Ohta, H. Miroguch, M. Hirano. Appl. Phys. Lett., **82**, 823 (2003).
- [15] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Наука, 1976).
- [16] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Induced photopleochroism oscillations of the ZnO/GaAs heterojunctions

S.E. Nikitin, Yu.A. Nikolaev, V.Yu. Rud'^{*}, Yu.V. Rud',
E.I. Terukov, N. Fernelius^{**}, J. Goldstein^{**}

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

^{*} St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

^{**} Air Force Wright Lab.,
Wright Patterson AFB, OH, USA

Abstract The aniso- and isotype ZnO/GaAs heterojunctions were obtained by magnetron sputtering of *n*-ZnO:Al thin films on the epitaxial *n*- and *p*-GaAs films. It was found a high photosensitivity ($\sim 5 \cdot 10^3$ V/W, $T = 300$ K) within 1.3–3.2 eV spectral range, the oscillations of the photosensitivity value being connected with optical radiation interference in thin ZnO films. The induced photopleochroism in heterojunctions under oblique incidence of linearly polarized radiation on ZnO film was observed. The induced photopleochroism oscillations within 1–55% ($\theta \sim 85^\circ$) range was related to the radiation interference phenomena in oxide films. The authors' conclusion is that heterojunctions can find practical applications as selective photosensors of natural and linearly polarized optical radiations.