

## Осцилляции наведенного фотоплеохроизма в тонкопленочных структурах In(Au)/Si

© В.М. Ботнарюк, Ю.В. Жиляев\*, В.Ю. Рудь†, Ю.В. Рудь\*

Университет Молдовы,  
MD 20009 Кишинев, Молдова

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

† Санкт-Петербургский государственный технический университет,  
192251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 июля 1998 г. Принята к печати 28 июля 1998 г.)

Изготовлены фоточувствительные структуры In(Au)/Si и исследованы их фотоэлектрические свойства при наклонном падении линейно поляризованного излучения со стороны барьерного контакта. Обнаружены осцилляции в спектральных зависимостях квантовой эффективности фотопреобразования и коэффициента наведенного фотоплеохроизма. Осцилляции объяснены интерференцией линейно поляризованного излучения в тонких пленках кремния.

Известно, что наведенный фотоплеохроизм  $P_I$  в поверхностно-барьерных структурах на кубических полупроводниках во всей области фоточувствительности остается практически неизменным, а его величина контролируется показателем преломления полупроводника и углом падения  $\Theta$  на приемную плоскость этих структур [1–3]. Недавно было установлено, что в условиях интерференции линейно поляризованного излучения (ЛПИ) во входном окне гетероперехода между пористой и кристаллической фазами Si возникают осцилляции наведенного фотоплеохроизма [4]. В данной работе предпринята первая попытка обнаружения осцилляций в спектральной зависимости фотоплеохроизма поверхностно-барьерных структур, созданных нанесением металлов на тонкие монокристаллические пленки кремния.

1. Монокристаллические пленки Si с толщиной  $d = 0.6–0.8$  мкм осаждались на сапфировые пластины газовой фазой методом. Слои Si на просвет были однородно окрашены в темно-желтый цвет и обладали высокой адгезией по отношению к использованным подложкам. Спектры оптического пропускания и фотопроводимости  $i_{pc}$  полученных слоев Si обычно содержат в спектральном диапазоне 1.2–2.5 эВ четкие осцилляции, обусловленные интерференцией падающего излучения (рис. 1). Яркая интерференционная картина указывает на высокое совершенство пленок. Оценки их толщины из положения соседних максимумов фотопроводимости с использованием известного для кремния показателя преломления [5] дают толщины пленок, отвечающие измеренным значениям.

2. Поверхностно-барьерные структуры создавались вакуумным термическим напылением слоев Au и In с толщинами 0.5–1 мкм на поверхность пленок Si, которая после их выращивания перед нанесением указанных металлов только обезжиривалась. Площадь готовых структур In(Au)/Si составляла  $\sim 1$  см<sup>2</sup>.

Полученные структуры обладали четким выпрямлением. Пропускное направление отвечало положительной

полярности внешнего смещения на барьерном контакте. Остаточное сопротивление таких структур лежало в диапазоне  $R_0 = 10^9–10^{11}$  Ом. При освещении структур In/Si и Au/Si наблюдается фотовольтаический эффект, причем барьерный контакт заряжается положительно относительно подложки, что коррелирует с пропускным направлением. Для лучших структур вольтовая фоточувствительность достигает 20–30 В/Вт при  $T = 300$  К и доминирует при их освещении со стороны барьерного контакта.

Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования  $\eta$  в естественном излучении для типичных структур In/Si и Au/Si приведены на рис. 2. Длинноволновая граница  $\eta$  в этих структурах определяется поглощением в кремнии и экстраполяции произведения фототока короткого замыкания

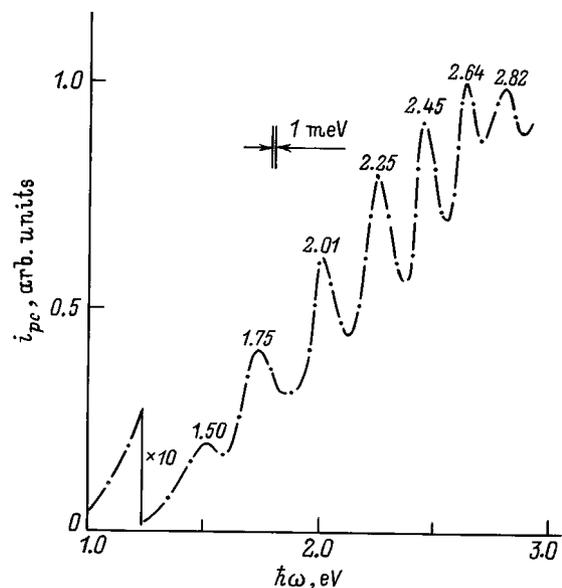
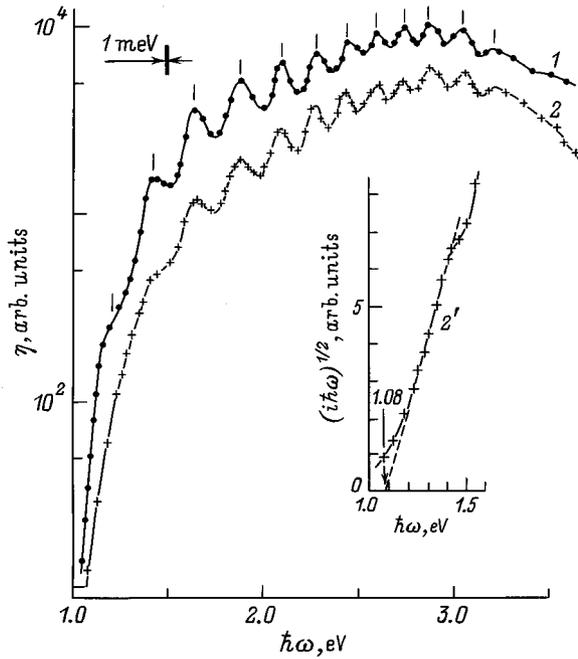


Рис. 1. Спектральная зависимость стационарной фотопроводимости пленки Si при  $T = 300$  К в естественном излучении.



**Рис. 2.** Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования структур In/Si (1) и Au/Si (2, 2') при  $T = 300$  К в естественном излучении (освещение вдоль нормали со стороны барьера).

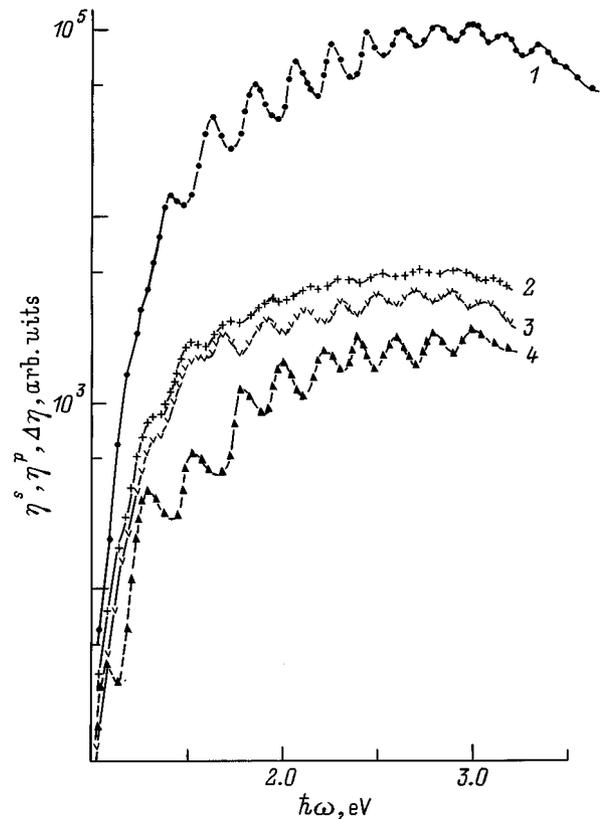
на энергию фотонов  $(i\hbar\omega)^{1/2}$  к  $\hbar\omega \rightarrow 0$  дает энергию отсечки  $E_0 = 1,08$  эВ (рис. 2, кривая 2'), что согласуется с известной для кристаллического кремния шириной запрещенной зоны [6]. Как видно из рис. 2, в обоих типах структур с ростом энергии фотонов в глубине фундаментального поглощения пленкой Si происходит рост  $\eta$ , а спад fotocувствительности проявляется только выше 3 эВ. Спектральные зависимости  $\eta$  полученных структур свидетельствуют об их достаточно высоком качестве в отношении подавления рекомбинации неравновесных электронно-дырочных пар на поверхности полупроводника. Характерно, что в спектрах fotocувствительности независимо от природы барьерного металла (In или Au) четко проявляются 12 максимумов  $\eta$ , которые соответствуют спектрам fotocувствительности пленок Si (рис. 1), на которых создавались эти структуры. Из этого факта следует, что осцилляции в спектрах fotocувствительности полученных поверхностно-барьерных структур обусловлены интерференцией падающего излучения именно в пленке полупроводника.

3. При освещении поверхностно-барьерных структур In(Au)/Si ЛПИ вдоль нормали к плоскости барьерного контакта ( $\Theta = 0^\circ$ ) fotocувствительность не зависит от положения электрического вектора световой волны  $\mathbf{E}$  относительно кристаллографических осей в кристалле Si. На рис. 3 (кривая 1) для одной из структур представлена спектральная зависимость fotocувствительности при двух ортогональных между собой поляризациях ЛПИ. Видно, что спектр  $\eta$  при  $\Theta = 0^\circ$  в ЛПИ соответствует полученному для естественного излучения. Этот факт

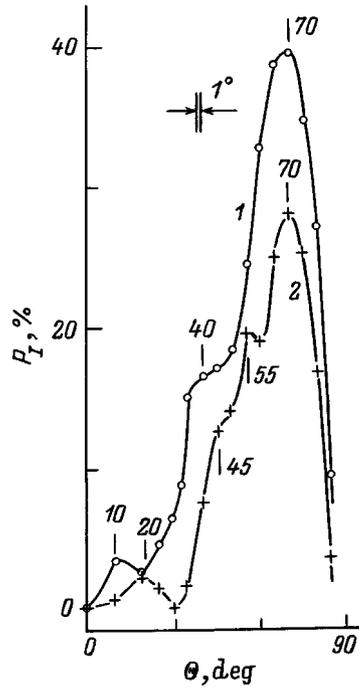
связан с тем, что fotocувствительность в кристалле кремния изотропна. С ростом  $\Theta > 0^\circ$  спектры fotocувствительности в поляризации параллельной плоскости падения ( $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$ )  $\eta^p$  начинают отличаться от спектров  $\eta^s$ , когда  $\mathbf{E} \perp \text{ПП}$ . Из рис. 3, где в качестве типичного примера представлены спектры  $\eta^p$  и  $\eta^s$  при  $\Theta = 50^\circ$ , видно, что для каждой поляризации ЛПИ проявляется своя спектральная зависимость fotocувствительности, причем относительное смещение этих зависимостей по оси ординат растет с увеличением  $\Theta$ . Для характеристики влияния поляризации на fotocувствительность структур обычно используют коэффициент наведенного fotocувствительности [7]

$$P_I = \left( \frac{\eta^p - \eta^s}{\eta^p + \eta^s} \right) 100\%, \quad (1)$$

где поляризационная разность  $\Delta\eta = \eta^p - \eta^s$  как раз и отражает смещение кривых fotocувствительности при изменении поляризации излучения. На рис. 3 представлена спектральная зависимость  $\Delta\eta(\hbar\omega)$  при  $\Theta = 50^\circ$  (кривая 4). Видно, что на кривой  $\Delta\eta(\hbar\omega)$  также обнаруживаются осцилляции. При этом в области максимумов  $\eta$ , которые связаны с максимальным эффектом просветления, локализуются минимумы  $\Delta\eta$  и, наоборот,



**Рис. 3.** Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности (1–3) и поляризационной разности (4) квантовой эффективности фотопреобразования структуры Au/Si при  $T = 300$  К в линейно поляризованном излучении (1 —  $\Theta = 0^\circ$ , 2 —  $\Theta = 50^\circ$ ).



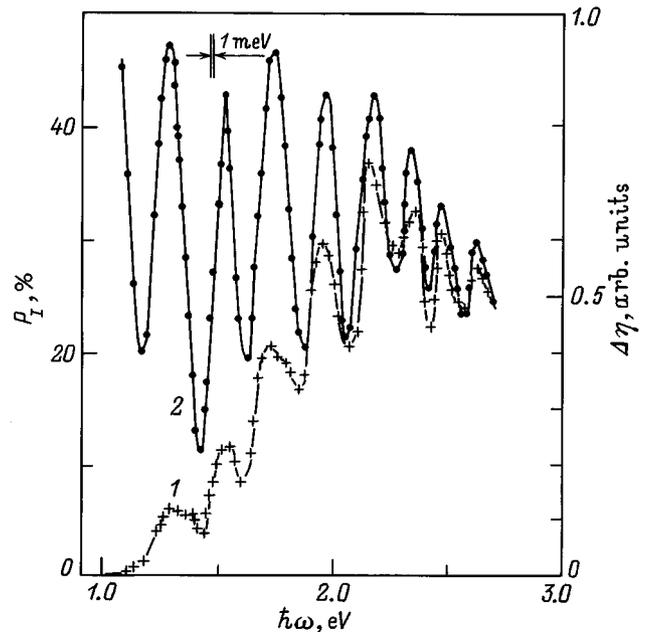
**Рис. 4.** Угловые зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма структуры  $\text{In}/\text{Si}$  при  $T = 300 \text{ K}$  ( $\hbar\omega, \text{эВ}$ : 1 — 1.96, 2 — 1.84).

в области минимумов  $\eta$ , свидетельствующих о максимальных потерях излучения на отражение, достигаются максимумы  $\Delta\eta$ . Сопоставляя кривые 2 и 3 (рис. 3), следует также обратить внимание на то, что глубина модуляции спектральных кривых фоточувствительности, как правило, более высокая для  $P$ -поляризации, а максимальному сближению  $\eta^s \rightarrow \eta^p$  соответствует минимум  $\Delta\eta$  и наоборот. Из уравнения (1) видно, что характер экстремума коэффициента наведенного фотоплекроизма (минимум или максимум) напрямую связан с характером экстремума  $\Delta\eta$ .

На рис. 4 представлены типичные для исследованных структур угловые зависимости коэффициента наведенного фотоплекроизма в окрестности соседних экстремумов  $\Delta\eta$ . Видно, что с ростом угла падения коэффициент наведенного фотоплекроизма изменяется немонотонно, как и в случае гетеропереходов пористый  $\text{Si}/\text{Si}$  [4], хотя главная тенденция этих изменений все же может быть сведена к увеличению  $P_I$  с ростом  $\Theta$  по близкой к квадратичной зависимости  $P_I \sim \Theta^2$ . Немонотонности в экспериментальных зависимостях  $P_I(\Theta)$  обусловлены интерференционными эффектами, которые чувствительны к эффективной толщине поглощающей среды. Из рис. 4 также видно, что характер угловых зависимостей  $P_I$  сохраняется при изменении длины волны, вызывающем переход от максимума к ближайшему минимуму  $P_I$ . При этом следует подчеркнуть, что понижение коэффициента фотоплекроизма (рис. 4) сопутствует снижению потерь на отражение и, соответственно, поляризационной разности фоточувствительности.

На основании выполненных исследований было также установлено, что в области максимумов в спектрах  $\Delta\eta$  (рис. 3, кривая 4) угловые зависимости квантовой эффективности  $\eta^p(\Theta)$  и  $\eta^s(\Theta)$  находятся в соответствии с ожидаемыми из соотношений Френеля, описывающих прохождение ЛПИ границы двух сред [8,9]. Действительно, для  $P$ -волны квантовая эффективность вначале растет с ростом  $\Theta$ , проходит через максимум, а затем снижается, тогда как для  $S$ -волны  $\eta$  монотонно падает с увеличением  $\Theta$ . Угловые зависимости  $\eta^p$  и  $\eta^s$  в области минимумов в спектрах  $\Delta\eta$  (рис. 3, кривая 4), свидетельствующих о минимизации потерь на отражение, становятся сходными и обнаруживают вначале рост квантовой эффективности, достижение максимума и затем спад при обеих поляризациях. Поэтому есть основания связывать снижение  $P_I$  с эффектом просветления.

Спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплекроизма для одной из типичных структур в сравнении с  $\Delta\eta(\hbar\omega)$  при фиксированном угле падения приведена на рис. 5. Видно, что в соответствии с вытекающей из (1) связью  $P_I \sim \Delta\eta$  в результате интерференции ЛПИ в пленке  $\text{Si}$  наблюдаются синфазные осцилляции как в спектрах поляризационной разности квантовой эффективности, так и в спектрах  $P_I$ . Период осциллирующей фотоплекроизма такой же, как и в фотопроводимости (рис. 1), поскольку также определяется интерференцией ЛПИ в кремниевой пленке. Максимальные значения коэффициента наведенного фотоплекроизма  $P_I^{\text{max}}$  при  $\Theta = 70^\circ$  достигают 48–50%, что на основании [10] дает величину показателя преломления  $n = 3.5$ , что близко к известному для  $\text{Si}$  [5]. Минимумы в спектре коэффи-



**Рис. 5.** Спектральные зависимости поляризационной разности квантовой эффективности фотопреобразования (1) и коэффициента наведенного фотоплекроизма (2) структуры  $\text{In}/\text{Si}$  при  $T = 300 \text{ K}$ .

циента наведенного фотоплекроизма  $P_I^{\min} = 10-18\%$  (рис. 5, кривая 2) обусловлены интерференционным просветлением и поэтому не могут использоваться для оценки  $n$ , поскольку в [10] явление интерференции не учитывалось.

Таким образом, интерференция ЛПИ в активной области фоточувствительных структур (на примере структур In/Si и Au/Si) сопровождается возникновением осцилляций в спектре коэффициента наведенного фотоплекроизма, что может найти применение в поляризационной фотоэлектронике при создании селективных фотоанализаторов ЛПИ.

## Список литературы

- [1] С.Г. Конников, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. Письма ЖТФ, **18**, 39 (1992).
- [2] S.G. Konnikov, V.Yu. Rud', Yu.V. Rud', D. Melebaev, A. Berkeliev, M. Serginov, S. Tilevov. Jpn. J. Appl. Phys., **32**, 515 (1993).
- [3] В.Ю. Рудь. Автореф. канд. дис. (СПб., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 1995).
- [4] В.Ю. Рудь, Ю.В. Рудь. ФТП, **31**, 245 (1997).
- [5] Е.М. Воронкова, Б.Н. Гречушников, Г.И. Дистлер, И.П. Петров. *Оптические материалы инфракрасной техники* (М., Наука, 1965).
- [6] Ю.И. Уханов. *Оптические свойства полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [7] Ю.В. Рудь. Изв. вузов. Физика, вып. 8, 68 (1968).
- [8] Г.С. Ландсберг. *Оптика* (М., Наука, 1976).
- [9] Р. Аззам, М. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).
- [10] G.A. Medvedkin, Yu.V. Rud'. Phys. St. Sol. (a), **67**, 333 (1981).

Редактор В.В. Чалдышев

## Induced photopleochroism of In(Au)/Si thin film structures

V.M. Botnaryuk, Yu.V. Zhilyaev\*, V.Yu. Rud'†, Yu.V. Rud'\*

University of Moldova,  
MD 20009 Kishinev, Moldova

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

† St.Petersburg State Technical University,  
195251 St.Petersburg, Russia

**Abstract** The structures of In(Au)/Si have been made. The photoelectric properties of these structures were studied in linearly polarized light that was inclined at some angle to barrier contact surface. It has been found that induced photopleochroism and photoconversion quantum efficiency behave like an oscillator. Oscillations are likely arise due to interference of linearly polarized light in Si thin films.