

06;07;12

Фоточувствительность гетеропереходов GaAs:N(GaP:N)/GaAs(GaP) в линейно поляризованном излучении

© В.И. Иванов-Омский¹, В.Ю. Рудь², Ю.В. Рудь¹¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный технический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 7 апреля 1998 г.)

Представлены результаты исследований фотоэлектрических свойств гетеропереходов (ГП) азотированный слой/GaAs (GaP), полученных плазменной обработкой кристаллов GaAs и GaP в присутствии ионов азота. Обнаружен широкополосный характер фоточувствительности ГП по отношению к интенсивности естественного излучения. Установлено, что при наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность азотированных слоев возникает поляризационная фоточувствительность, которая контролируется углом падения Θ и растет пропорционально Θ^2 . Полученные спектральные зависимости наведенного фотополюхронизма связываются с антиотражающими свойствами широкозонных слоев. Гетеропереходы на основе азотированных слоев могут применяться в качестве широкополосных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения.

Введение

Недавно нами было установлено, что обработка поверхности монокристаллов арсенида и фосфида галлия высокочастотным разрядом в атмосфере азота приводит к возникновению в приповерхностной области широкозонных слоев, обусловленных замещением атомов мышьяка или фосфора на азот [1]. Такое замещение ведет к возникновению в глубине фундаментального поглощения исходных полупроводников коротковолновой фотолюминесценции и широкополосной фоточувствительности по отношению к интенсивности естественного излучения вплоть до 3.8 eV. В настоящей работе представлены результаты измерений фоточувствительности в линейно поляризованном излучении (ЛПИ) гетеропереходов (ГП), образованных в приповерхностной области кристаллов GaAs и GaP широкозонными слоями GaAs:N и GaP:N, которые в дальнейшем для краткости будем именовать *N*-слоями.

Методика эксперимента

Для создания гетеропереходов использовались ориентированные в плоскостях (100) или (111) пластины GaAs и GaP *n*-типа проводимости с концентрацией свободных электронов $\cong 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 300 \text{ K}$. Зеркальная поверхность исходных полупроводников приготавливалась путем механической, а затем химической полировки. Такие пластины помещались в вакуумированную камеру с остаточным давлением около 10^{-5} mm Hg , в которую затем производился напуск смеси водорода и азота и поджигалась высокочастотная плазма. На границе GaAs и GaP с плазмой возникал градиент химического потенциала, что и вызывало твердофазное замещение атомов мышьяка и фосфора в подложках на азот. Температура

подложек в процессе плазменной обработки контролировалась в диапазоне 50–500°C. Разработанные режимы плазменного замещения As (*P*) \rightarrow N позволили получить в приповерхностных областях исходных кристаллов однородно окрашенные слои с зеркально-гладкой наружной поверхностью. Слои обнаружили высокую адгезию по отношению к GaAs и GaP. На плоскостях (100) и (001) GaAs в результате плазменного замещения были получены однородно окрашенные слои темно-желтого цвета, тогда как при аналогичных условиях на пластинах GaP возникали слои с красно-лиловой окраской. Эти различия могут быть обусловлены различными атомным составом и толщинами слоев.

Изготовленные гетероструктуры устанавливались на столике Федорова, который позволял с точностью не хуже 30' контролировать угловые координаты образцов. Свет в этих экспериментах падал на поверхность *N*-слоев, а угол падения Θ изменялся в диапазоне от 0 до 90°. Вольт-амперные характеристики (ВАХ), угловые и спектральные зависимости относительной квантовой эффективности η измерялись на ГП GaAs:N/*n*-GaAs и GaP:N/*n*-GaP со средними размерами фоточувствительной поверхности $5 \times 5 \text{ mm}$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1. Типичные стационарные ВАХ для полученных ГП приведены на рис. 1 и 2 (кривые 1), а некоторые их параметры указаны в таблице. Видно, что ГП обладают ярко выраженным выпрямлением и при прямых смещениях, отвечающих отрицательной полярности внешнего напряжения на подложках и превышающих напряжение

Фотоэлектрические свойства гетеропереходов GaAs:N/n-GaAs и GaP:N/n-GaP при $T = 300$ К

Параметры ГП	GaAs:N/n-GaAs	GaP:N/n-GaP
d_s, mm	0.3	0.3
$d_L, \mu\text{m}$	$\cong 0.5$	$\cong 0.8$
R_0, Ω	$4 \cdot 10^3 - 10^5$	$10^5 - 10^6$
U_0, V	0.25–1.8	1–1.2
β	1.8–2.0	7–10
$I_{tr}, \mu\text{A}$	0.2–1 ($U_{tr} = 1 \text{ V}$)	0.1–1 ($U_{tr} = 5 \text{ V}$)
$S_U, \text{V/W}$	$10^2 - 10^4$	$10 - 10^3$
s, eV^{-1}	80–115	14–18
$\delta_{1/2}, \text{eV}$	1.1–1.8	0.8–1.0

отсечки $U > U_0$, ток следует соотношению

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

где R_0 — остаточное сопротивление.

Напряжение отсечки, как и R_0 , изменяется в полученных ГП в достаточно широких пределах (см. таблицу) и отражает влияние условий образования N -слоев на электрические свойства ГП. В области малых прямых токов ВАХ следуют известному для диодных структур экспоненциальному закону. Результаты оценки коэффициента идеальности β позволяют считать, что в структурах N/n -GaAs прямой ток имеет рекомбинационную природу, что характерно и для гомопереходов на основе GaAs [2]. Высокие значения β в ГП N/n -GaP отражают влияние на ВАХ последовательного сопротивления и поэтому не дают возможности судить о природе токопереноса. В обратно смещенных ГП ток в большинстве случаев следовал степенному закону $I \sim U^\gamma$, где показатель γ лежит в пределах 1.2–2, что указывает на несовершенства в периферии ГП. Диапазон изменения обратных токов I_{tr} представлен в таблице и указывает на достаточно хорошее качество лучших ГП этого типа.

2. При освещении обоих типов ГП N -слои всегда заряжались положительно относительно подложек. Фотовольтаический эффект доминирует при освещении со стороны N -слоев, а диапазон реализованных значений вольтовой чувствительности S_U представлен в таблице. Знак фотонапряжения холостого хода во всех ГП соответствует пропускному направлению и не зависит ни от места попадания светового зонда на поверхность ГП, ни от энергии падающих фотонов.

Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(\hbar\omega)$ для некоторых ГП приведены на рис. 1 и 2 (кривые 2 и 3). Эти спектры дают представление о диапазоне возможностей развитого метода получения в плане управления фоточувствительностью ГП. Главные особенности полученных спектральных зависимостей η состоят в следующем. В обоих видах структур наблюдается типичный для идеальных ГП широкополосный характер фоточувствительности. Как следует из рис. 1 и 2,

максимальная фоточувствительность наблюдается в диапазоне между ширинами запрещенных зон кристаллов подложек и GaN [3]. Длинноволновая часть спектров фоточувствительности ($\hbar\omega < 1.8$ эВ для N/n -GaAs и $\hbar\omega < 3$ эВ для N/n -GaP) обусловлена фотоактивным поглощением в подложках GaAs и GaP. Наблюдаемые различия в величине длинноволновой фоточувствительности (рис. 1 и 2) могут быть обусловлены как колебаниями в совершенстве исходных подложек, так и влиянием условий выращивания N -слоев на их свойства. Крутизна длинноволнового роста фоточувствительности $s = \delta(\ln I)/\delta(\hbar\omega)$ приведена в таблице и является типичной для бинарных полупроводников GaAs и GaP. Полная ширина спектральных зависимостей $\eta(\hbar\omega)$ на их полувысоте $\delta_{1/2}$ характеризует их широкополосный характер, а наблюдаемые изменения этого параметра отражают влияние условий формирования слоев (см. таблицу). Коротковолновый спад фоточувствительности для полученных ГП локализован в окрестности E_G^{GaN} и

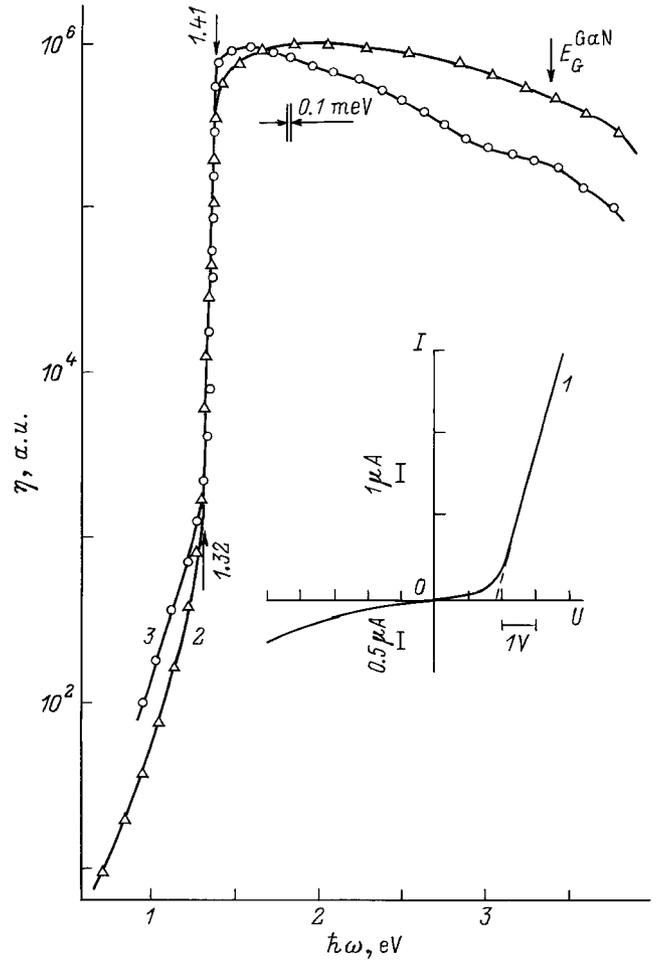


Рис. 1. Стационарная вольт-амперная характеристика (1) и спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования (2, 3) гетеропереходов GaAs:N/n-GaAs при $T = 300$ К в естественном излучении: 1, 3 — образец 1; 2 — образец 6; освещение со стороны широкозонного слоя.

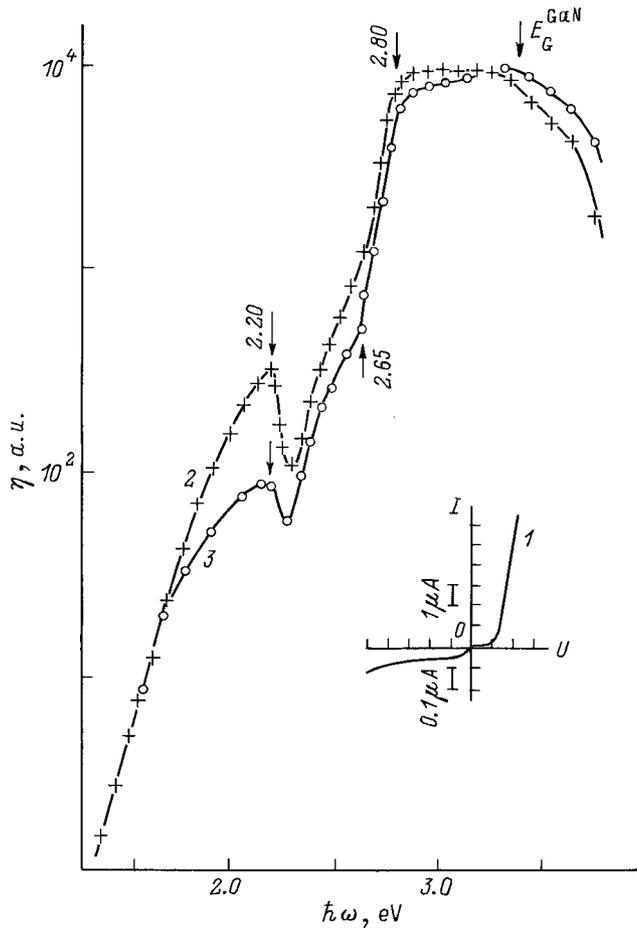


Рис. 2. Стационарная вольт-амперная характеристика (1) и спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования (2, 3) гетеропереходов GaP:N/n-GaP при $T = 300$ К в естественном излучении: 1, 2 — образец 4; 3 — образец 1; освещение со стороны широкозонного слоя.

этот факт может быть основанием для предположения о приближении атомного состава в приповерхностной области N -слоев к стехиометрии GaN.

3. При освещении линейно поляризованным излучением по нормали к плоскости N -слоев ($\Theta = 0$) во всех полученных ГП фототок не зависел от поляризации. Это означает, что фотоактивное поглощение в таких условиях изотропно и коэффициент естественного фотоплекроизма $P_N = 0$ во всей области fotocувствительности ГП [4–6]. Как только угол падения ЛПИ становится отличным от 0, во всех ГП возникают различия между фототоками i^P , когда электрический вектор световой волны \mathbf{E} лежит в плоскости падения излучения (ПП), т. е. $\mathbf{E} \parallel \text{ПП}$, и i^S ($\mathbf{E} \perp \text{ПП}$). В условиях $\Theta > 0$ во всей области fotocувствительности фототок в зависимости от азимутального угла φ между \mathbf{E} и ПП следует периодическому закону

$$i_\varphi = i^P \cos^2 \varphi + i^S \sin^2 \varphi. \quad (2)$$

Для ГП с различным атомным составом и ориентациями подложек в пределах всей области fotocувствительности выполняется неравенство $i^P > i^S$ при $\Theta > 0$. На рис. 3 и 4 приведены типичные зависимости $i^P(\Theta)$ и $i^S(\Theta)$ для исследованных ГП. Видно, что для обоих типов ГП фототок i^P с ростом угла падения вначале увеличивается, достигает своего максимального значения i_{\max}^P , а затем начинает падать. Эта зависимость находится в соответствии с результатами анализа процесса прохождения световой волной границы двух сред на основании соотношений Френеля [7]. Рост фототока связан с устранением потерь на отражение, которые минимальны в окрестности угла Брюстера. Экспериментальные величины отношения i_{\max}^P/i_0^P для обоих типов ГП подтверждают связь природы роста фототока с устранением потерь на отражение. Одновременно экспериментально проявляющаяся особенность $i^P(\Theta)$ с учетом результатов [4,8,9] позволяет сделать заключение

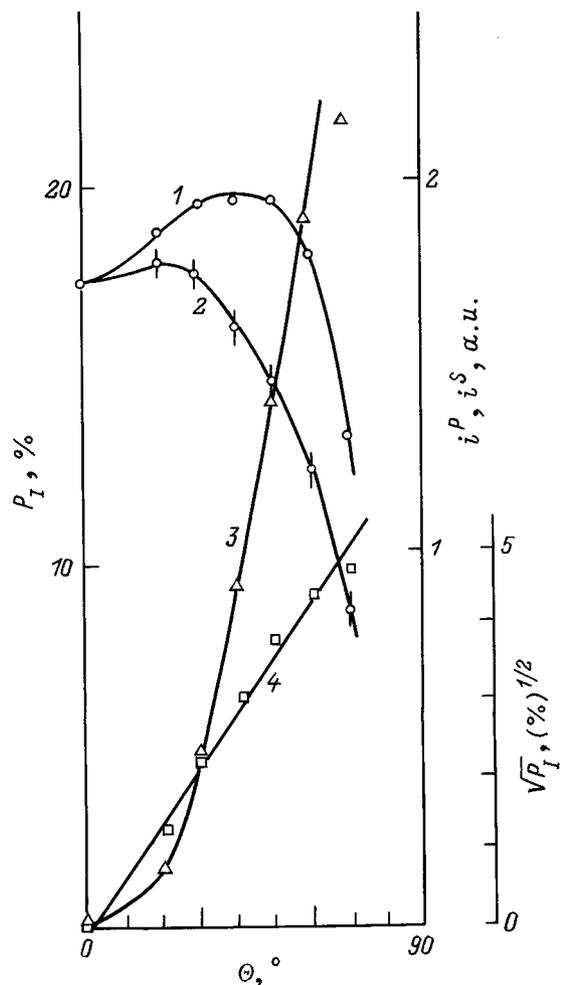


Рис. 3. Зависимости фототока короткого замыкания (1 — i^P , 2 — i^S) и коэффициента наведенного фотоплекроизма (3, 4) от угла падения ЛПИ на приемную плоскость гетероперехода GaAs:N/n-GaAs при $T = 300$ К. Освещение со стороны широкозонного слоя, $\lambda = 0.60 \mu\text{m}$, образец 6.

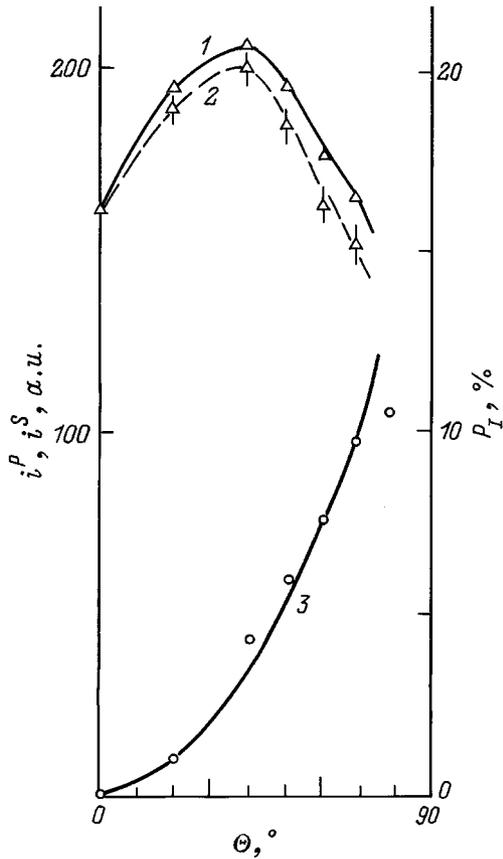


Рис. 4. Зависимости фототока короткого замыкания (1 — i^P , 2 — i^S) и коэффициента наведенного фотоплеохроизма (3) от угла падения ЛПИ на приемную плоскость гетероперехода GaP:N/n-GaP при $T = 300$ К. Освещение со стороны широкозонного слоя, $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, образец 1.

о достаточно высоком оптическом качестве полученных на подложках GaAs и GaP N -слоев.

Второй важный результат поляризационных исследований фоточувствительности сводится к тому, что вопреки вытекающему из соотношений Френеля монотонному падению фототока i^S с ростом Θ [4,9] для большинства из полученных нами ГП фототок i^S с ростом угла падения ведет себя подобно i^P (рис. 3 и 4, кривые 2). Из-за этого происходит сближение между кривыми $i^P(\Theta)$ и $i^S(\Theta)$, причем это сближение оказалось более выраженным в случае GaP:N/n-GaP структур (рис. 4, кривая 2). Такая закономерность ранее была обнаружена и связывалась с интерференцией ЛПИ в тонком слое [10,11]. Поэтому есть основания полагать, что обнаруженное anomalous поведение $i^S(\Theta)$ для изученных ГП может быть связано с интерференционными эффектами ЛПИ в N -слоях. Сам факт проявления интерференции также свидетельствует о высоком оптическом качестве полученных слоев.

Рассчитанный из зависимостей $i^P(\Theta)$ и $i^S(\Theta)$ коэффициент наведенного фотоплеохроизма [5,6]

$$P_I = (i^P - i^S)/(i^P + i^S) \quad (3)$$

для полученных ГП становится отличным от нуля при $\Theta > 0$ и возрастает с увеличением угла падения ЛПИ по квадратичному закону $P_I \sim \Theta^2$ (рис. 3 и 4, кривые 3). Эти зависимости линеаризуются в координатах $P_I^{1/2} - \Theta$ (рис. 3, кривая 4), что находится в соответствии с результатами [12].

Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма при $\Theta = \text{const}$ для нескольких ГП приведены на рис. 5. Из него следует, что коэффициент наведенного фотоплеохроизма в полученных ГП имеет выраженную зависимость от энергии падающих фотонов, что не согласуется с анализом [12]. Действительно, в [12] было показано, что величина коэффициента наведенного фотоплеохроизма пропорциональна показателю преломления n среды, и эта закономерность уже длительное время находит применение для определения величины n из поляризационных измерений фоточувствительности [4,6]. Недавно было установлено, что в условиях интерференции ЛПИ такая однозначная связь $P_I \sim n$ нарушается и возникает дисперсия наведенного фотоплеохроизма [10,11]. С учетом [10,11] наблюдаемая в данной работе спектральная зависимость коэффициента наведенного фотоплеохроизма также может быть связана с антиотражающими свойствами N -слоев. Полученные зависимости $P_I(\hbar\omega)$ позволяют считать, что эффект просветления, условием которого является $P_I \rightarrow 0$ [10,11], наиболее ярко проявляется для структур N/n -GaP (рис. 5, кривая 3), у которых экспериментальные значения $P_I \rightarrow 0$ в достаточно широком диапазоне от 2.5 до 3.5 eV, т.е. в спектральной области максимальной фоточувствительности таких ГП (рис. 2). С позиций критерия просветления $P_I \rightarrow 0$ [10,11] можно сделать вывод о том, что в ГП N/n -GaAs этот эффект проявляется намного слабее, хотя следует подчеркнуть локализацию минимума P_I для обоих типов ГП в одинаковом спектральном диапазоне. На рис. 5 приводятся спектры

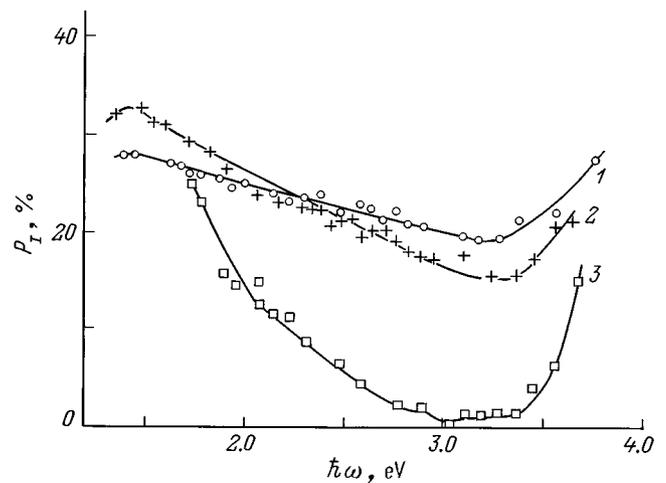


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента наведенного фотоплеохроизма гетеропереходов GaAs:N/n-GaAs (1 — образец 1, 2 — образец 6) и GaP:N/n-GaP (3 — образец 1) при $T = 300$ К и $\Theta = 70^\circ$.

$P_I(\hbar\omega)$ для двух разных ГП N/n -GaAs (кривые 1 и 2). Близость значений P_I и его спектрального контура двух разных ГП указывает на достаточно хорошую технологическую воспроизводимость качества N -слоев.

Из полученных зависимостей $P_I(\hbar\omega)$ следует, что для достижения высоких значений коэффициента наведенного фотоплетохроизма и использования таких ГП в качестве широкополосных фотоанализаторов линейно поляризованного излучения необходимо построить технологический процесс таким образом, чтобы избежать интерференции ЛПИ в широкозонном слое этих структур.

Список литературы

- [1] Агекян В.Ф., Иванов-Омский В.И., Князевский и др. // ФТП. 1998. Т. 32. Вып. 10. С. 1203–1205.
- [2] Арсенид галлия / Под ред. Ф.П. Кесаманлы, Д.Н. Наследова. М.: Наука, 1975. 353 с.
- [3] Физико-химические свойства полупроводниковых материалов. Справочник. М.: Наука, 1978. 339 с.
- [4] Рудь Ю.В. // Изв. вузов. Физика. 1986. Т. 29. № 8. С. 68–83.
- [5] Рудь В.Ю. // Автореф. канд. дис. Санкт-Петербург, 1995. 17 с.
- [6] Konnikov S.G., Rud' V.Yu., Rud' Yu.V. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 1993. Vol. 32. Suppl. 32-3. P. 515–518.
- [7] Azzam R.M., Bashara N.M. Ellipsometry and Polarized Light. Amsterdam; New York: Holland Publishing Company, 1977. 584 p.
- [8] Жилев Ю.В., Назаров Н., Рудь В.Ю. и др. // ФТП. 1993. Т. 27. С. 1610–1616.
- [9] Ботнарюк В.М., Горчак Л.В., Пleshка В.Н. и др. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 2. С. 241–245.
- [10] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 2. С. 241–245.
- [11] Вальтер Т., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Шок Г.В. // ФТП. 1997. Т. 31. Вып. 7. С. 806–810.
- [12] Medvedkin G.A., Rud' Yu.V. // Phys. St. Sol. (a). Vol. 67. N 1. P. 333–336.