

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ GaP-СТРУКТУР НА Si-ПОДЛОЖКАХ

Ю. В. Жиляев, Н. Назаров, В. Ю. Рудь, Ю. В. Рудь, Л. М. Федоров

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

(Получена 22 января 1993 г. Принята к печати 10 марта 1993 г.)

Изложены экспериментальные результаты исследований поляризационной фоточувствительности структур $p-n$ -GaP/ n -Si и p -GaP/ n -Si, полученных эпитаксией слоев фосфида галлия на кремниевых подложках. Установлено, что структуры обладают фоточувствительностью в различных спектральных областях.

Обнаружено возникновение поляризационной фоточувствительности при наклонном падении линейно поляризованного излучения на поверхность структур GaP/Si, величина коэффициента фотополюхроизма которых определяется углом падения θ . Фотополюхроизм возрастает пропорционально θ^2 , а максимальное значение составило $\sim 50\%$ при $\theta \approx 80^\circ$. Сделан вывод о возможности применения структур на основе слоев GaP на Si в качестве поляриметрических фотодетекторов.

Интерес к созданию эпитаксиальных слоев $A^{III}B^V$ на кремниевых подложках и приборных структур на их основе возник давно, и круг исследований в этом направлении непрерывно расширяется [1-6], поскольку они сулят надежды объединить потенциальные возможности главных материалов полупроводниковой электроники Si и $A^{III}B^V$ при разработке новых полупроводниковых приборов. Отметим, что фотоэлектрические свойства эпитаксиальных слоев $A^{III}B^V$ и приборных структур на Si-подложках исследованы недостаточно, причем эти исследования проводились исключительно при воздействии естественным неполяризованным излучением [5-7].

В настоящей работе представлены результаты впервые предпринятых исследований фотоэлектрических свойств эпитаксиальных GaP-структур на Si-подложках в линейно поляризованном излучении.

1. Структуры GaP/Si создавались выращиванием слоев GaP на Si-подложках методом газофазной эпитаксии в открытой хлоридной системе Ga (GaP)—PCl₃—H₂ [8].

Объектами исследования служили структуры GaP/Si двух типов. Первый тип — гетероструктуры p -GaP/ n -Si с толщиной эпитаксиального слоя фосфида галлия ~ 3 мкм. Второй тип — структуры $p-n$ -GaP на Si-подложках, где толщины эпитаксиальных слоев n - и p -GaP составляли соответственно 6 и 2 мкм.

Эпитаксиальные слои n -GaP в структурах второго типа выращивались на подложках n -Si и в процессе эпитаксии легировались теллуром и ссрой до концентраций электронов $n \approx (1 \div 3) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Слои p -GaP выращивались или на подложках n -Si, или в структурах n -GaP/ n -Si и в процессе эпитаксии легировались цинком до концентраций дырок $p \approx (0.5 \div 1) \cdot 10^{17}$ см⁻³.

В качестве подложек, предназначенных для получения структур p -GaP/ n -Si и $p-n$ -GaP/ n -Si, применялись полированные пластины Si марки КЭФ-001 толщиной ~ 400 мкм с разориентацией относительно плоскости (100) под углом $(4 \div 6)^\circ$ в направлении (110).

Площади исследованных структур $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ и $p\text{-}n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ составляли $S \approx (6 \div 10) \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Омические контакты создавались сплавлением металла в атмосфере очищенного водорода при температурах $550 \div 600 \text{ }^\circ\text{C}$, причем для эпитаксиальных слоев $p\text{-GaP}$ использовался состав $\text{In} + 2\% \text{ Zn}$, а для подложек $n\text{-Si}$ — $\text{In} + 2.5\% \text{ Te}$.

Фотоэлектрические свойства структур $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ (первый тип) и $p\text{-}n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ (второй тип) исследовались при воздействии как естественным, так и линейно поляризованным излучением. Методика поляризационных измерений фоточувствительности подробно описана в работе [9].

2. Типичные спектральные зависимости фоточувствительности обоих типов структур в естественном свете приведены на рис. 1.

На гетероструктурах $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ фоточувствительность наблюдается в широкой спектральной области. Длинноволновая граница фототока короткого замыкания (рис. 1, кривая 1) формируется поглощением в кремнии. Максимальная фоточувствительность наблюдается в диапазоне энергий падающих фотонов $h\nu = 1.3 \div 1.6 \text{ эВ}$, тогда как с ростом энергии фотонов выше 1.6 эВ наступает спад фоточувствительности, свидетельствующий о рекомбинации фотогенерированных носителей заряда через локальные состояния в области гетерограницы. Наличие локальных состояний обусловлено в первую очередь расстройством параметров решеток Si (5.4310 \AA) и GaP (5.4505 \AA). Для этих гетероструктур, как видно из рис. 1, фоточувствительность в области межзонного поглощения в широкозонной компоненте гетероструктуры, т. е. в GaP , оказалась незначительной.

В структурах, представляющих собой гетерокontakt $n\text{-Si}$, и гомопереходе $p\text{-}n\text{-GaP}$, напротив, фоточувствительность в области поглощения излучения в кремнии оказывается много ниже, чем в области межзонного поглощения в фосфиде галлия. Как видно из рис. 1 (кривая 2), спектральный контур фоточувствительности таких структур представляет собой широкую асимметричную полосу с максимумом при $h\nu_{\text{max}} \approx 2.62 \text{ эВ}$ (полная ширина этой полосы на полувысоте $\delta_{1/2} \approx 260 \text{ мэВ}$) включает две компоненты — коротковолновую $\delta_{sw} \approx 90 \text{ мэВ}$ и более широкую длинноволновую $\delta_{sw} \approx 170 \text{ мэВ}$. Спектральный контур

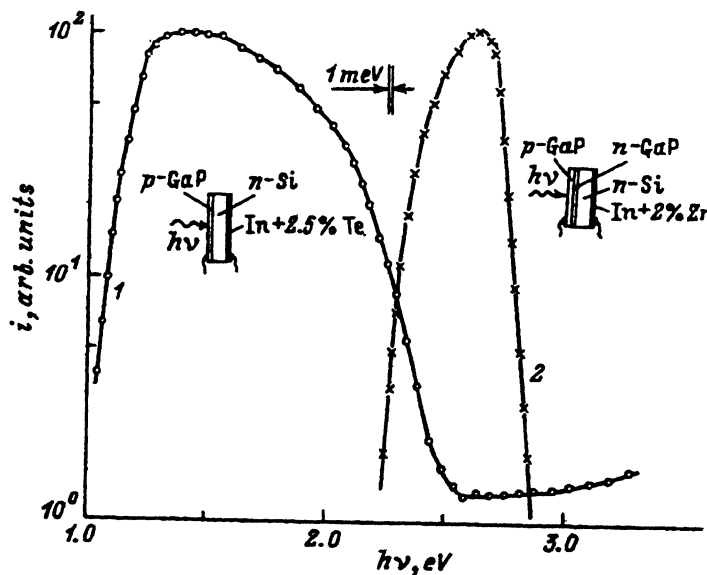


Рис. 1. Спектральные зависимости фоточувствительности структур $p\text{-GaP}/n\text{-Si}$ (1) и $p\text{-}n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ (2) в естественном свете при $T = 300 \text{ К}$. На вставках — схематическое изображение структур.

фототока i при $h\nu < 2.6$ эВ спрямляется в координатах $\sqrt{i} = f(h\nu)$ и при экстраполяции этой зависимости к $i=0$ дает отсечку от оси энергий фотонов при $h\nu \approx 2.22$ эВ, что согласуется с энергией непрямых оптических переходов в фосфиде галлия [10].

Таким образом, для структур $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ фоточувствительность доминирует в области поглощения в широкозонном слое GaP, тогда как вкладом поглощения в кремнии вообще можно пренебречь. Резкий коротковолновый спад фоточувствительности в таких структурах при $h\nu > 2.7$ эВ можно, по-видимому, связать с тем, что поглощение излучения осуществляется в слое GaP, который удален от активной области структуры на расстояния, превышающие длину диффузионного смещения фотоэлектронов.

3. При воздействии на структуры обоих типов линейно поляризованным излучением, направляемым по нормали к освещаемой плоскости, как следует из рис. 2 (кривая 1), фототок не зависит от положения плоскости поляризации. Как только угол падения излучения θ перестает равняться нулю, поляризационная индикатриса фототока i_φ представляет собой периодическую зависимость от азимутального угла φ между электрическим вектором световой волны E и плоскостью падения P излучения (рис. 2, кривые 2 и 4). Эта зависимость следует соотношению $i_\varphi = i^{\parallel} \cos^2 \varphi + i^{\perp} \sin^2 \varphi$, где значки « \parallel » и « \perp » отвечают фототоку в поляризациях $E \parallel P$ и $E \perp P$ соответственно.

Такой характер поляризационных индикатрис наблюдается во всей области фоточувствительности структур, причем глубина модуляции фототока i^{\parallel}/i^{\perp} плавно растет с увеличением угла падения (рис. 2).

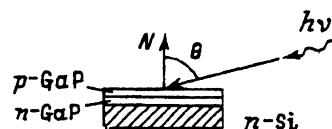
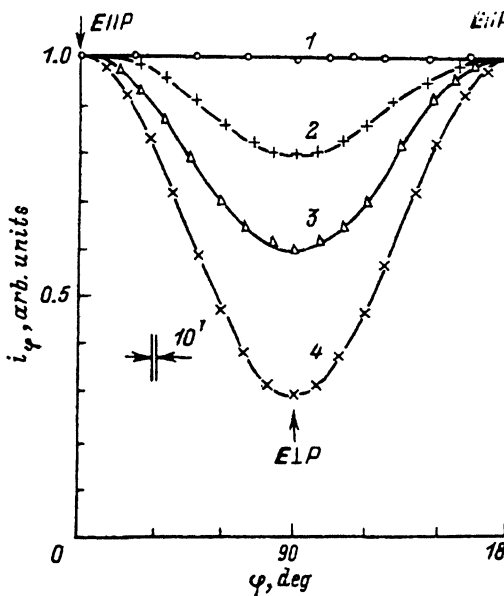


Рис. 2. Поляризационные индикатрисы фототока структуры $p-n\text{-GaP}/n\text{-Si}$ при различных углах падения линейно поляризованного излучения. $T=300$ К, $\lambda=0.49$ мкм, θ , град: 1—0, 2—40, 3—58, 4—82. На вставке — схема освещения структуры при поляризационных измерениях.

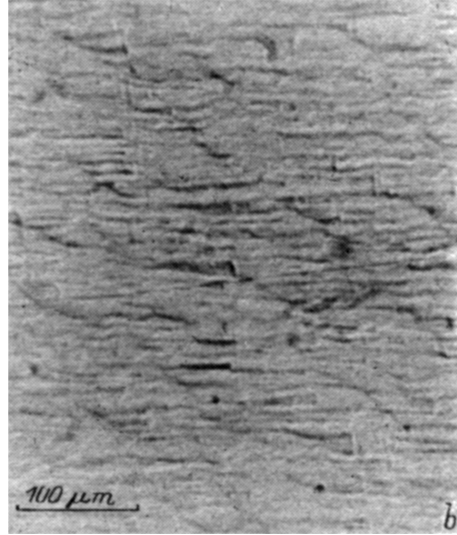
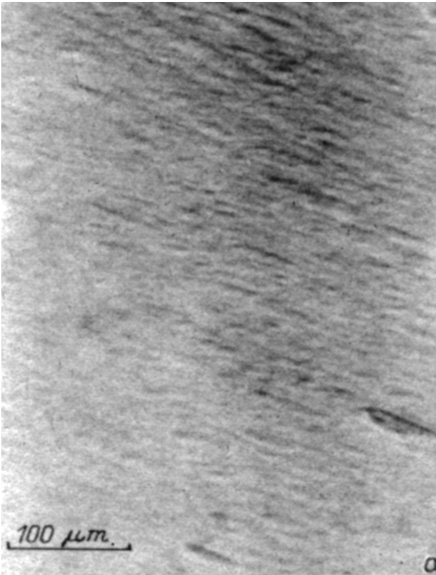
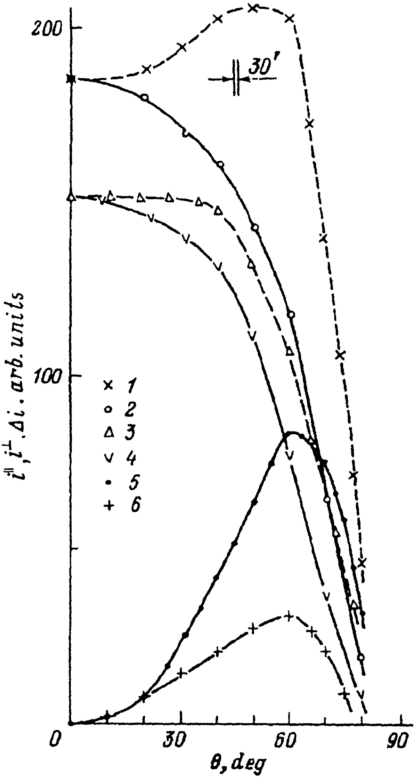


Рис. 3. Микрофотографии поверхности эпитаксиальных слоев GaP на Si-подложках для двух образцов: а — 168-2, б — 168-1.



Структура поверхности эпитаксиальных слоев GaP на Si-подложках зависела от условий их выращивания. На рис. 3 приведены микрофотографии поверхности эпитаксиальных слоев GaP с различающейся морфологией (образцы 168-1 и 168-2), что проявилось в различном характере угловых зависимостей фототока $i^{\parallel}(\theta)$.

На рис. 4 представлены типичные примеры угловых зависимостей фототоков i^{\parallel} и i^{\perp} , а также их разности $\Delta i = i^{\parallel} - i^{\perp}$ для двух структур $p-n$ -GaP/ n -Si с различным качеством поверхности слоя GaP: для образца 168-1 (рис. 3, б) поверхность была более шероховатой, чем у 168-2 (рис. 3, а). При этом следует заметить, что спектральные зависимости фоточувствительности в таких образцах при освещении неполяризованным излучением были практически идентичными. Различие в степени шероховатости поверхности сравниваемых структур (рис. 3) очень четко проявилось в зависимостях $i^{\parallel}(\theta)$ и $i^{\perp}(\theta)$. Так, в образце 168-2 (рис. 3, а) фототок $i^{\parallel}(\theta)$ вначале возрастает, достигая вблизи $\theta = 50 \div 60^{\circ}$ миниму-

Рис. 4. Зависимости фототоков i^{\parallel} (1, 3), i^{\perp} (2, 4) и поляризационной разности Δi (5, 6) от угла падения линейно поляризованного излучения на поверхность слоя p -GaP в структурах $p-n$ -GaP/ n -Si. $T = 300$ К. Образцы: (1, 2, 5) — 168-2; (3, 4, 6) — 168-1. $\lambda = 0.49$ мкм.

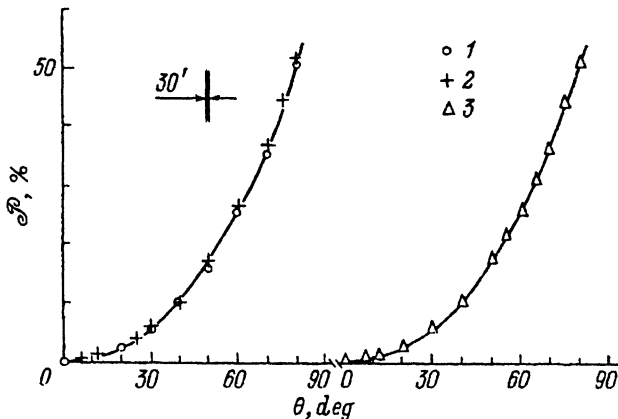


Рис. 5. Зависимости коэффициента фотоплекхроизма $\mathcal{P} = \Delta i / (i^{\parallel} + i^{\perp})$ от угла падения линейно поляризованного излучения для образцов структуры $p-n$ -GaP/ n -Si. 168-1 (1), 168-2 (2) и структуры p -GaP/ n -Si (3).

ма, а затем начинает спадать, тогда как фототок $i^{\perp}(\theta)$ монотонно снижается с ростом θ от нуля. Такой характер поляризационных зависимостей соответствует ожидаемому из соотношений Френеля для амплитудных коэффициентов прохождения поляризованного света через границу воздух—кристалл [11]. Тогда увеличение фототока i^{\parallel} в окрестности псевдобрюстеровского угла падения $\theta = 50 \div 60^\circ$ можно связать с устранением потерь на отражение для световой волны с поляризацией $E \parallel P$. В случае же образца 168-1 с сильно шероховатой поверхностью GaP (рис. 3, в) фототоки i^{\parallel} и i^{\perp} сразу, как только наступает условие $\theta > 0^\circ$, начинают монотонно понижаться, хотя между ними и сохраняется различие по амплитуде (рис. 2, кривые 3 и 4). Существенно, что в образце 168-1 (рис. 3, в) в зависимости $i^{\parallel}(\theta)$ максимум исчезает.

Из проведенного сравнения можно сделать вывод о том, что поляризационные измерения фототока при наклонном падении линейно поляризованного излучения могут быть использованы для неразрушающей экспрессной диагностики оптического качества наружной поверхности слоев, входящих в состав приборных структур. Поляризационные разности фототоков, как и сами фототоки, также имеют очевидную связь с качеством поверхности наружного слоя. Эта связь состоит в том, что для слоя с более гладкой поверхностью (образец 168-2) поляризационная разность фототока растет (рис. 4, кривые 5 и 6) и более четко проявляется максимум в зависимости $\Delta i(\theta)$ вблизи псевдобрюстеровского угла, как и в случае [12].

Путем изменения величины угла падения линейно поляризованного излучения коэффициент фотоплекхроизма \mathcal{P} в исследованных структурах удается плавно в соответствии с законом $\mathcal{P} \sim \theta^2$ перестраивать в диапазоне от нуля до $\sim 50\%$ при достижении $\theta \approx 80^\circ$ (рис. 5, кривые 1—3), причем эффект сохраняется во всей области fotocувствительности. Необходимо подчеркнуть, что во всех структурах кривые $\mathcal{P}(\theta)$ и $\Delta i(\theta)$ «выходят» из нуля. Это обстоятельство позволяет считать, что фотоплекхроизм, который в принципе может возникнуть, например из-за деформации эпитаксиального слоя GaP толстой подложкой Si, в исследуемых структурах оказывается много меньше наведенного наклонным падением линейно поляризованного излучения.

4. На рис. 6 представлены спектральные зависимости фототоков i^{\parallel} , i^{\perp} и их разности Δi для двух типов структур p -GaP/ n -Si и $p-n$ -GaP/ n -Si (168-2) при наклонном падении линейно поляризованного излучения. Главные закономерности состоят в следующем. Спектральные контуры фототоков i^{\parallel} и i^{\perp} практически не отличаются от аналогичных зависимостей и неполяризованном свете. Как

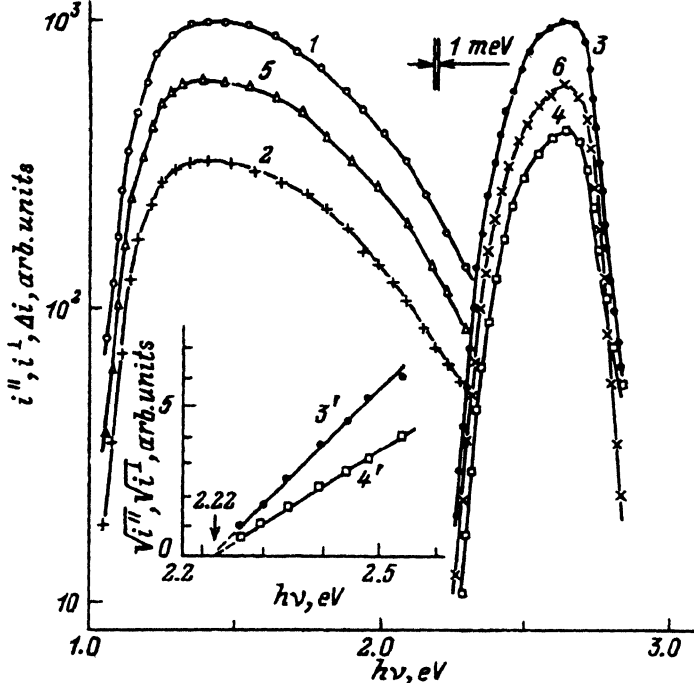


Рис. 6. Спектральные зависимости фототоков i^{\parallel} (1, 3), i^{\perp} (2, 4) и поляризационной разности Δi (5, 6) для структур $p-n$ -GaP/ n -Si, образец 168-2 (3, 4, 6) и p -GaP/ n -Si (1, 2, 5). На вставке — зависимости $\sqrt{i^{\parallel}} = f(h\nu)$ (3') и $\sqrt{i^{\perp}} = f(h\nu)$ (4') для структуры $p-n$ -GaP/ n -Si, образец 168-2.

видно из рис. 6, во всей области fotocувствительности преобладает фототок, соответствующий поляризации $E \parallel P$, а переход к-поляризации $E \perp P$ сопровождается в основном понижением величины фототока. Спектральная кривая поляризационной разности фототоков Δi (рис. 6, кривые 5 и 6) с ростом угла θ приближается к спектральной зависимости i^{\parallel} . Из рис. 6 можно также видеть, что длинноволновый край спектра фототока в обеих поляризациях для структуры $p-n$ -GaP/ n -Si спрямляется в координатах $\sqrt{i^{\parallel}} - f(h\nu)$ таким образом, что отсечка

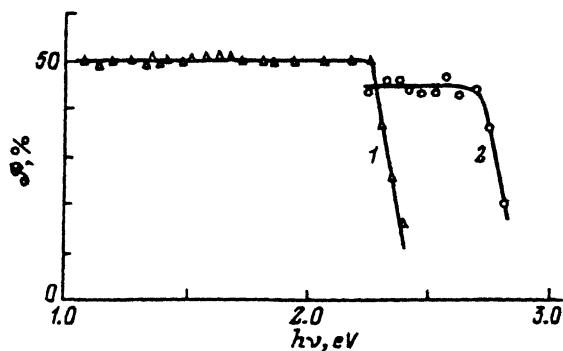


Рис. 7. Спектральные зависимости коэффициента фотохроизма структур p -GaP/ n -Si (1) и $p-n$ -GaP/ n -Si, образец 168-2 (2). $T = 300$ К. θ , град: 1 — 78, 2 — 75.

по оси энергий оказывается для обеих типов структур в области высокой чувствительности, в пределах погрешности измерений значения энергий отсечки оказались не чувствительными к поляризации.

Коэффициент фотоплекроизма обоих типов структур в области высокой фоточувствительности остается практически постоянным (рис. 7). Его величина, как следует из рис. 5, легко задается с помощью угла падения и при фиксированном значении θ остается неизменной в пределах области высокой фоточувствительности полученных структур, что является характерным признаком явления наведенной поляризационной фоточувствительности [13].

Таким образом, на основании проведенных измерений можно сделать вывод о том, что в работе выявлена поляризационная фоточувствительность структур p -GaP/ n -Si и p - n -GaP/ n -Si, полученных методом газозафазной эпитаксии в открытой хлоридной системе.

Спектральный диапазон поляризационной фоточувствительности определяется конструкцией структур GaP/Si, величина коэффициента фотоплекроизма которых устанавливается посредством выбора необходимого угла падения линейно поляризованного излучения на поверхность таких структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. S. Kesperis, R. S. Yatsko, P. A. Newman. Technical report Ecom — 2471. VS Army Electronicscommand. Fort Monmouth. New Jersey (1964).
- [2] H. Huber, G. H. Winstel. Siemens Forch Entwicck. Bericht., 2, 171 (1973).
- [3] S. Gonda, Y. Matsushima, S. Mukai, Y. Makita, O. Jgarashi. Japan J. Appl. Phys., 17, 1043 (1978).
- [4] H. Mori, M. Ogasawara, M. Yamamoto, M. Tackikawa. Appl. Phys. Lett., 51, 1245 (1987).
- [5] Н. Н. Герасименко, Л. В. Лежейко, Е. В. Любопытова, Л. В. Шаронова, А. Г. Шаршунов, А. Я. Шик, Ю. В. Шмарцев. ФТП, 15, 1088 (1981).
- [6] Л. Б. Карлина, Е. И. Леонов, Л. В. Шаронова, Ю. В. Шмарцев. ФТП, 15, 1202 (1981).
- [7] Y. Itoh, T. Nishioka, A. Yamamoto, M. Yamaguchi. Appl. Phys. Lett., 52, 1617 (1988).
- [8] Ю. В. Жилаев, В. В. Криволапчук, Н. Назаров, И. П. Никитина, Н. К. Полетаев, Д. В. Сергеев, В. В. Травников, Л. М. Федотов. ФТП, 24, 1303 (1990).
- [9] А. А. Абдурахимов, Ю. В. Рудь, В. Е. Скорюкин, Ю. К. Ундалов. ЖПС, 37, 463 (1982).
- [10] Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник. 340. М. (1979).
- [11] Г. С. Ландсберг. Оптика. 936. М. (1976).
- [12] С. Г. Конников, Д. Мелебаев, В. Ю. Рудь, Л. М. Федоров. Письма ЖТФ. 18, 11 (1992).
- [13] G. A. Medvedkin, Yu. V. Rud. V. Phys. St. Sol. (a), 67, 333 (1981).

Редактор Л. В. Шаронова