

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА AlGaAs—GaAs-ГЕТЕРОСТРУКТУР С ТУННЕЛЬНО-ТОНКИМ «ШИРОКОЗОННЫМ ОКНОМ»

Андреев В. М., Воднев А. А., Ларионов В. Р.,
Пруцких Т. А., Румянцев В. Д., Расулов К. Я., Хвостиков В. П.

Исследованы зависимости коэффициента сбора фотогенерированных носителей (\mathcal{Q}) от толщины ($W=20\div 300$ Å) и состава ($x=0.15\div 0.9$) слоев твердых растворов в гетероструктурах n -GaAs— p -GaAs— p -AlGaAs, полученных методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии. Определены оптимальные параметры этих слоев ($w=50\div 60$ Å; $x=0.7$), при которых достигается значительное расширение фоточувствительности в коротковолновую (ультрафиолетовую) область спектра и обеспечиваются минимальные потери на туннелирование через широкозонный слой и поверхностную рекомбинацию носителей в полосе прозрачности твердого раствора.

Увеличение фоточувствительности в коротковолновой области спектра в AlGaAs-фотопреобразователях может быть достигнуто при уменьшении толщины широкозонного слоя $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.7\div 0.9$). На основе таких структур с толщиной фронтального слоя, уменьшенной до $300\div 1000$ Å, были получены [1-4] солнечные элементы с наиболее высоким КПД преобразования солнечного излучения. Коэффициент сбора в таких элементах практически постоянен и близок к 100 % в спектральном интервале $0.85\div 0.5$ мкм и уменьшается при $\lambda < 0.45$ мкм. Снижение потерь на поглощение в «широкозонном окне» для фиолетовой области спектра может быть обеспечено при дальнейшем уменьшении толщины слоя твердого раствора (< 300 Å). Однако при таких толщинах широкозонных слоев существенными могут оказаться процессы туннелирования и баллистического выброса «горячих» носителей [5] из узкозонной (GaAs) области на поверхность структуры с последующей их рекомбинацией.

В настоящей работе нами представлены результаты исследования фотоэлектрических свойств структур n -GaAs— p -GaAs— p -Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As, в которых толщина слоя твердого раствора варьировалась в пределах от нескольких сот ангстрем до $20\div 30$ Å, а состав твердого раствора $Al_xGa_{1-x}As$ изменялся в диапазоне $x=0.15\div 0.9$.

Экспериментальные образцы

Структуры n -GaAs— p -GaAs— p -Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As изготавливались методом низкотемпературной жидкофазной эпитаксии [6-9]. Снижение температуры роста ($400\div 550$ °C) позволило осуществить прецизионную кристаллизацию квантово-размерных планарных слоев толщиной менее 100 Å. Сначала на подложке n -GaAs выращивался эпитаксиальный слой n -GaAs толщиной ~ 5 мкм, затем выращивались слой p -GaAs толщиной 2 мкм, легированный германием ($p=0.1\div 1\cdot 10^{18}$ см $^{-3}$), и слой p -Al $_x$ Ga $_{1-x}$ As, легированный магнием ($p\approx 10^{18}$ см $^{-3}$). К p -слою изготавливались полосковые токоотводящие контакты, а к n -подложке — сплошные. Антиотражающие покрытия не наносились.

Контроль эпитаксиальных структур осуществлялся методами эллипсометрии, ОРФЭС и прецизионного анодного окисления [1-12]. Исследования мо-

дельных структур методом ОРФЭС [11, 12] показали, что при низкотемпературной жидкофазной эпитаксии обеспечивается получение планарных Al—Ga—As слоев толщиной до $20 \div 30 \text{ \AA}$ с «переходными» слоями толщиной до $10 \div 15 \text{ \AA}$.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фототовета фотоэлементов с толщиной широкозонных слоев 200 и 50 \AA , содержание AlAs в которых варьировалось от $x=0.9$ (кривые 1) до $x=0.15$ (кривые 5). На рис. 1, а приведены для сравнения спектры фототовета структуры с твердым раствором $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ толщиной 0.1 мкм (кривая 8) и структуры со стравленным широкозонным слоем (кривая 6). Известно, что более высокое значение Q в широком спектральном интервале может быть получено и в структурах с p - n -переходом в GaAs без широкозонного

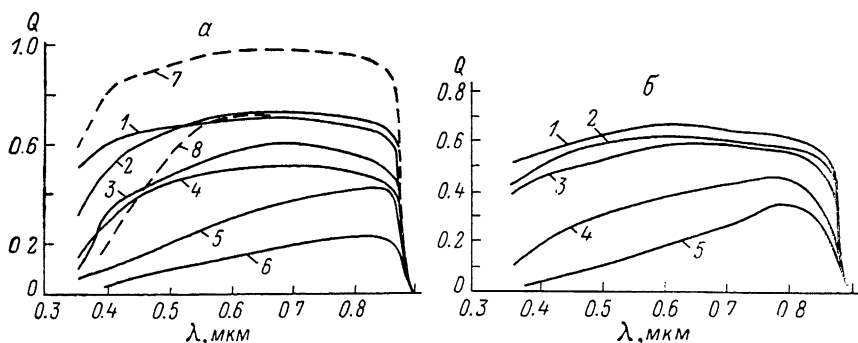


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента сбора для фотоэлементов на основе структур n -GaAs— p -GaAs— p - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с толщиной широкозонных слоев $W=200$ (а) и 50 \AA (б).

x : 1 — 0.9, 2 — 0.7, 3 — 0.5, 4 — 0.3, 5 — 0.15, 6 — 0, 7 — 0.7, 8 — 0.8 ($W=0.5$ мкм).

окна, например, при толщине фронтального слоя GaAs, уменьшенной до ~ 0.1 мкм [13], и при создании в этом слое тянущего поля градиента концентрации примеси. В настоящей работе использование структур с относительно большой толщиной ($d_p=2$ мкм) слоя p -GaAs позволило более наглядно выявить процессы туннельного выброса фотоносителей из слоя p -GaAs на поверхность структуры при уменьшении толщины и ширины запрещенной зоны твердого раствора.

Кривые 1—6, 8 (рис. 1) получены на образцах без просветляющих покрытий, а кривая 7 — спектральная зависимость коэффициента сбора, пересчитанная из кривой 2 (рис. 1, а) с учетом коэффициента отражения. Достижение значения $Q_{\text{max}} \approx 0.95$ (в спектральном интервале $0.55 \div 0.8$ мкм, кривая 7) свидетельствует практически о полном сборе носителей в структуре со слоем p -GaAs толщиной 2 мкм и широкозонным слоем $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.7 \div 0.9$) толщиной 200 \AA . Как видно из рис. 1, б, такое же значение Q достигается при уменьшении толщины слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.7 \div 0.9$) до $50 \div 70 \text{ \AA}$. Сравнение кривых 1, 2 (рис. 1, а, б) с кривой 8 (рис. 1, а) показывает, что при одинаковой высокой фоточувствительности в спектральном диапазоне $0.55 \div 0.85$ мкм в структурах с ультратонкими ($50 \div 200 \text{ \AA}$) широкозонными слоями заметно увеличивается чувствительность в коротковолновой (фиолетовой) области спектра ($\lambda < 0.45$ мкм). Однако такое увеличение Q достигается только при достаточной величине потенциального барьера на гетерогранице p -GaAs— p - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \geq 0.7$), препятствующего туннельному выбросу фотоносителей из слоя p -GaAs.

Как видно из кривых 3—5 (рис. 1, а, б), уменьшение содержания AlAs в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ приводит при $x \leq 0.5$ к уменьшению величины Q как в области прозрачности широкозонного окна, так и в коротковолновой области спектра.

Для более детального анализа полученных спектров фототовета на рис. 2 построены зависимости величины Q от толщины слоя W твердого раствора раз-

личного состава при двух фиксированных значениях длины волны возбуждающего излучения: $\lambda=0.4$ (рис. 2, а) и $\lambda=0.63$ мкм (рис. 2, б). Как видно из приведенных на рис. 2, а кривых 2, 3, уменьшение толщины W от 300 до $50\div 70$ Å приводит к возрастанию Q при $\lambda=0.4$ мкм, причем темп роста больше в образце со значением параметра x в слое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, равным 0.5 (рис. 2, а, кривая 3), что объясняется большей скоростью уменьшения потерь на поглощение при уменьшении W в слоях с меньшей шириной запрещенной зоны.

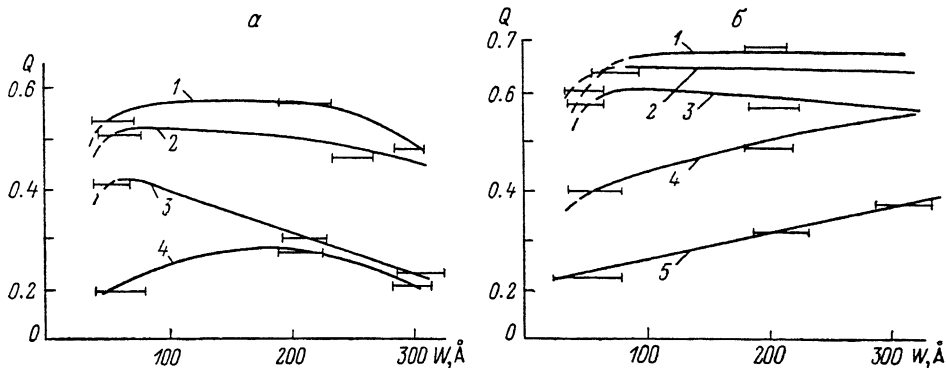


Рис. 2. Зависимости коэффициента собирания от толщины широкозонных слоев при длинах волн возбуждающего излучения $\lambda=0.4$ (а) и 0.63 мкм (б).

1—5 — значения x в слоях $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ те же, что и на рис. 1.

При $x=0.9$ (рис. 2, а, кривая 1) уменьшение толщины W в интервале $300\div 200$ Å ведет к небольшому возрастанию Q , а затем в интервале от 200 до $50\div 70$ Å значение Q сохраняется на максимальном уровне, что связано практически с полной прозрачностью слоя $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной $W < 200$ Å для излучения с $\lambda=0.4$ мкм.

При $x=0.3$ (рис. 2, а, кривая 4) уменьшение толщины широкозонного слоя сначала (в интервале $300\div 200$ Å) приводит к увеличению Q ($\lambda=0.4$ мкм), а затем ($W < 200$ Å) к его снижению.

Рассмотрим теперь зависимости Q от толщины W твердых растворов для длины

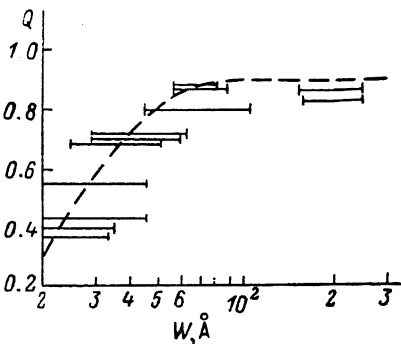


Рис. 3. Зависимость внутреннего коэффициента собирания от толщины широкозонных слоев $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.7-0.8$) при длине волны излучения $\lambda=0.63$ мкм.

волны возбуждающего излучения $\lambda=0.63$ мкм (рис. 2, б). В образцах $n\text{-GaAs}-p\text{-GaAs}-p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x=0.5\div 0.7$ при уменьшении W от 300 до $50\div 70$ Å сохраняется почти постоянное значение Q , немного увеличивающееся при возрастании содержания AlAs в твердом растворе (рис. 2, б, кривые 1—3). При $x=0.3$ и 0.15 (рис. 2, б, кривые 4, 5) при уменьшении W в интервале $300\div 50$ Å происходит монотонное снижение Q . Подобным же образом происходит снижение и в полосе прозрачности ($\lambda \approx 0.7\div 0.8$ мкм) этих твердых растворов (рис. 1, б, кривые 4, 5). Такое поведение образцов с ультратонкими широкозонными слоями отличается от поведения структур с более толстыми слоями твердого раствора, в которых коэффициент собирания в полосе прозрачности (обозначим его как Q_0) имеет почти постоянное максимальное значение. Причина снижения Q_0 при уменьшении E_g широкозонного окна в образцах с $W < 300$ Å, так же как и при уменьшении толщины «окна» (рис. 2, б, кривые 4, 5), заключается в увеличении вероятности туннелирования носителей из $p\text{-GaAs}$

в слой твердого раствора и на его поверхность при уменьшении высоты и эффективной толщины потенциального барьера, разделяющего область генерации фотоносителей и приповерхностный слой AlGaAs с обратным тянущим полем поверхностного загиба зон.

Приведенные результаты показывают, что оптимальное содержание AlAs в слое твердого раствора, обеспечивающее максимально широкий спектральный интервал фоточувствительности при сохранении коррозионной устойчивости слоя $Al_xGa_{1-x}As$, составляет 70÷80 мол%. Для образцов с таким составом широкозонного слоя было выполнено более детальное исследование зависимости $Q=f(W)$ в диапазоне толщин $W=100\div 20 \text{ \AA}$ (рис. 3). Постоянное высокое значение Q ($\lambda=0.63 \text{ мкм}$) сохраняется в этих образцах до толщин $W=50\div 60 \text{ \AA}$. Снижение Q при $W < 50\div 60 \text{ \AA}$ объясняется увеличением вероятности туннельного выброса фотоносителей из p -GaAs на поверхность структуры и увеличением доли фотоэлектронов, захватываемых потенциальной «ямой», образованной поверхностным загибом зон.

Таким образом, проведенные исследования позволили экспериментально установить зависимости коэффициента собирания фотоносителей от толщины ($W=20\div 300 \text{ \AA}$) и состава ($x=0.15\div 0.9$) твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ и найти оптимальные параметры этих слоев, при которых достигается расширение фоточувствительности в коротковолновую область спектра при сохранении максимальных значений Q в полосе прозрачности твердого раствора.

В заключение авторы выражают признательность К. Ю. Погребницкому, Б. Я. Беру, А. В. Никитину, А. М. Минтаинову за помощь в измерениях структуры и Ж. И. Алфёрову за внимание к данной работе.

Л и т е р а т у р а

- [1] Андреев В. М., Егоров Б. В., Лантратов В. М., Румянцев В. Д., Трошков С. И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 8. С. 1658—1660.
- [2] Аллахвердиев А. М., Егоров Б. В., Лантратов В. М., Трошков С. И. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 11. С. 2312—2314.
- [3] Андреев В. М., Румянцев В. Д., Салиева О. К., Сараджишвили Н. М., Сулима О. В. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 6. С. 1124—1129.
- [4] Hamaker H. C., Ford C. W., Werthen I. G., Virshup G. F., Kaminar N. R., King D. L., Gee I. M. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. N 1. P. 762—764.
- [5] Егоров Б. В., Мезрин О. А. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 14. С. 890—893.
- [6] Андреев В. М., Ивентьева О. О., Конников С. Г., Погребницкий К. Ю., Пурон Э., Сулима О. В., Фалеев Н. Н. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 9. С. 533—537.
- [7] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Воднев А. А., Конников С. Г., Ларионов В. Р., Погребницкий К. Ю., Румянцев В. Д., Хвостиков В. П. // Письма ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 18. С. 1089—1093.
- [8] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Воднев А. А., Ивентьева О. О., Ларионов В. Р., Румянцев В. Д. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 2. С. 384—383.
- [9] Андреев В. М., Воднев А. А., Минтаинов А. М., Румянцев В. Д., Хвостиков В. П. // ФТП. 1987. Т. 22. В. 7. С. 1211—1215.
- [10] Андреев В. М., Воднев А. А., Ларионов В. Р., Расулов К. Я., Румянцев В. Д., Хвостиков В. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 15. С. 1428—1433.
- [11] Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Конников С. Г., Ларионов В. Р., Погребницкий К. Ю., Фалеев Н. Н., Хвостиков В. П. // Письма ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 2. С. 171—176.
- [12] Бакалейников Л. А., Конников С. Г., Погребницкий К. Ю., Фалеев Н. Н. // Тез. докл. I Всес. конф. «Физические методы исследования поверхности и диагностики материалов и элементов вычислительной техники». Кишинев, 1986. С. 26.
- [13] Garozzo M., Parretta A., Maletta G., Adonceschi V., Gentili M. // Sol. Energy Mater. 1986. V. 14. N 1. P. 21—51.