

[5] Блинов В.И., Геринг Г.И., Елисеев Н.А. // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 11. С. 2228-2231.

Харьковский государственный
университет
им. А.М. Горького

Поступило в Редакцию
7 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 7
06.3; 12

12 апреля 1989 г.

СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ $p-i-n$ ФОТОДИОД
НА ОСНОВЕ $GaInAsSb$ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО
ДИАПАЗОНА 1.5-2.3 мкм

И.А. Андреев, М.А. Афраилов,
А.Н. Баранов, С.Г. Конников,
М.А. Мирсагатов, М.П. Михайлова,
О.В. Салата, В.Б. Уманский,
Г.М. Филаретова, Ю.П. Яковлев

В ИК-волоконно-оптических линиях связи на основе флюоридных волокон в спектральном диапазоне 2-4 мкм ожидаются потери менее 0.01 дБ/км [1], что на порядок ниже, чем в кварцевых волокнах в диапазоне 1.3-1.6 мкм. Прогресс, достигнутый в технологии создания таких волокон [2], и сообщение о первом промышленном выпуске флюоридного волокна [3] стимулируют интерес к созданию элементной базы ИК-ВОЛС III поколения (источников света и фотоприемников) для этого спектрального диапазона.

В последние годы появились сообщения о создании эффективных инжекционных лазеров на основе твердых растворов $GaInAsSb$ для диапазона 2-2.4 мкм [4-6], в том числе работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре [7], а также некоторые работы по фотоприемникам для этого диапазона на основе многокомпонентных твердых растворов A^3B^5 [8, 9].

Ранее [9] мы сообщали о создании и исследовании первых неохлаждаемых фотодиодов с постоянной квантовой эффективностью ~ 0.6 в диапазоне 1.4-2.2 мкм и быстродействием $\tau \approx 0.5$ нс, а также лавинных фотодиодов [10] на основе твердых растворов $GaInAsSb / GaAlAsSb$.

В настоящей работе приведены результаты создания и исследования сверхбыстродействующего $p-i-n$ фотодиода на основе $GaInAsSb$.

Структуры выращивались методом ЖФЭ на подложке $GaSb$ p -типа с концентрацией носителей заряда $p = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Слой твердого раствора толщиной 2 мкм $GaInAsSb$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0.53$ эВ, специально не легированного, покрывался широкозонным слоем $N^+ - GaAlAsSb$ с концентрацией $N = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ($E_g \approx 1.2$ эВ) и толщиной 3 мкм.

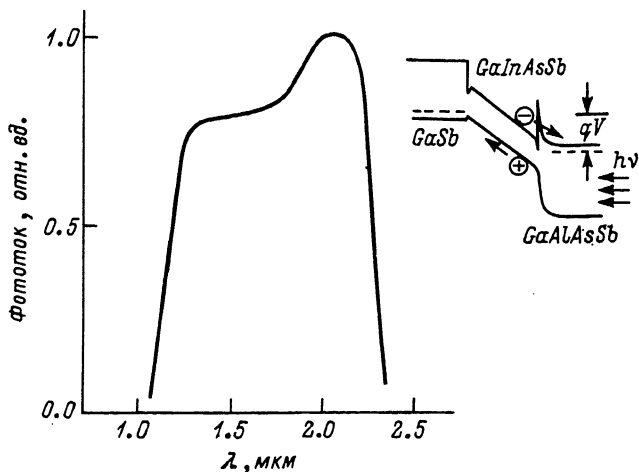


Рис. 1. Спектральное распределение фоточувствительности $p-i-n$ ФД $GaInAsSb / GaAlAsSb$. $T=300$ К. На вставке показана схематически зонная диаграмма $p-i-n$ структуры при обратном смещении.

Концентрация носителей заряда в активном узкозонном слое $GaInAsSb$ составляла $p^0=4.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, как было установлено из измерений зависимости емкости от напряжения. Отметим, что эта концентрация была на порядок ниже, чем ранее сообщалось в [8, 10]. Собственная концентрация в твердом растворе $GaInAsSb$ с $E=0.53$ эВ составляет $n_i=4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Фотодиоды изготавливались методом фотолитографии в виде мезадиодов с диаметром площадки $\phi 90$ мкм. Контакты наносились напылением сплавов $Au:Zn$ к подложке $p-GaSb$ и $Au:Te$ к широкозонному окну с последующим напылением слоя Ag . Схематически структура $p-i-n$ диода представлена на рис. 1, а.

Были исследованы вольт-амперные и вольт-Фарадные характеристики диодов, спектральное распределение чувствительности, а также быстродействие $p-i-n$ диодов методом импульсной растровой электронной микроскопии.

Зависимость емкости от напряжения была характерной для $p-i-n$ диодов. Минимальное значение емкости в режиме истощения составило $C=0.4$ пф при смещении $V=2$ В. Ширина ОПЗ составила 2 мкм, что соответствовало толщине узкозонного слоя $GaInAsSb$. Такое низкое значение емкости было достигнуто благодаря малой концентрации носителей заряда в этом слое. Темновой ток при напряжении 0.5 В составлял 8–10 мкА и был связан с током генерации – рекомбинации в слое ОПЗ.

Спектры фотоответа снимались на монохроматоре $SPM-2$ с призмой LiF .

На рис. 1 приведено спектральное распределение фоточувствительности $p-i-n$ диода $GaInAsSb / GaAlAsSb$ при комнатной

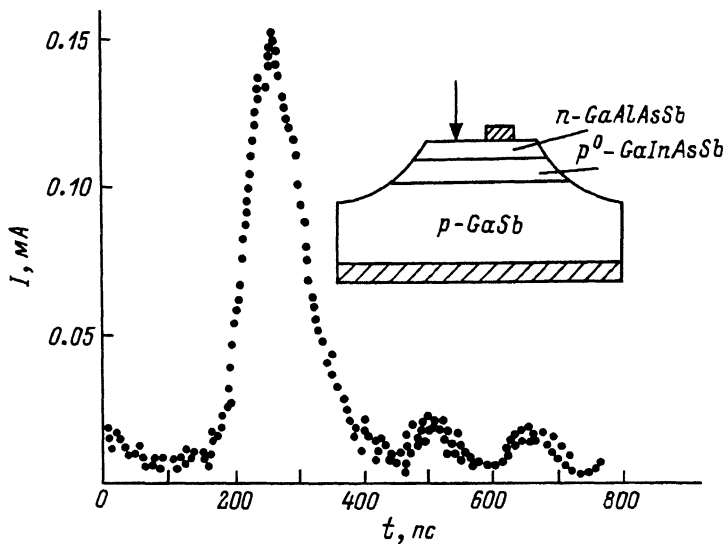


Рис. 2. Кинетика тока, индуцированного электронным зондом, при импульсном возбуждении $p-i-n$ структуры. На вставке показана структура $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ в $p-i-n$ фотодиода.

температуре. Величина фототока фактически не зависела от приложенного напряжения. Монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda = 2\text{--}2.2$ мкм составляла ~ 1.0 А/Вт. Размер чувствительной площадки $p-i-n$ диода был $6 \cdot 10^{-5}$ см². Спад фотоответа в коротковолновой области спектра связан, по-видимому, с добавочным поглощением в сильнолегированном накрывающем слое $N^+ \text{GaAlAsSb}$ толщиной 3 мкм.

Быстродействие $p-i-n$ диодов исследовалось методом импульсной растровой микроскопии. Экспериментальная установка включала растровый электронный микроскоп РЭМ-100У с пикосекундным модулятором электронного пучка, стробоскопический осциллограф С1-91/3, управляемый ЭВМ МЕРА-60, СВЧ-держатель образца и вакуумную систему вывода сигналов для регистрации [11]. Минимальная длительность импульса составляла 25–35 пикосекунд, в зависимости от тока пучка.

Исследуемые диоды были смонтированы в разрыве 50-омной полосковой линии, сигнал с которой подавался через коаксиально-полосковый переход на вход стробоскопического осциллографа. Измерения проводились при ускоряющем напряжении 45 кВ. При этом, как показали расчеты [12] с использованием функции генерации электронно-дырочных пар, в квазинейтральных областях диодов, прилегающих к ОПЗ, возбуждалось не более 20 % носителей тока.

Пиковое значение тока пучка в импульсе составляло $5 \cdot 10^{-8}$ А, что соответствует мощности облучения ~ 1 мВт в локальной области диода размером около 2 мкм. Частота следования импульсов находилась в диапазоне 30–100 КГц.

На рис. 2 представлены результаты кинетики исследования фототовета в локальных областях диодной структуры $InGaAsSb/AlAsSb$ при подаче обратного смещения $V = 4$ В. Время нарастания импульсов ($\tau_H = 50$ пс) определяется сверткой трех характерных времен: длительности возбуждающего импульса, RC – компонентой (в используемой конструкции диода $C = 0.4$ пф) и временем нарастания переходной характеристики осциллографа (~ 30 пс). Время спада, помимо упомянутых факторов, лимитируется временем пролета носителей в активной области $p-i$ - n диода. Используя подход, развитый в [13], время пролета может быть оценено как $t_{np} = 45-50$ пс, что соответствует дрейфовой скорости носителей заряда (предположительно, дырок) $v_{gp} = (5-6) \cdot 10^6$ см/с в полях $E \sim 2 \cdot 10^4$ В/см. В твердых растворах $GaInAsSb$ дрейфовая скорость ранее не измерялась. Однородность фоточувствительности и быстродействия по площади структур была не хуже 5%.

Отметим, что в исследуемых $p-i$ - n фотодиодах в области спада импульса фототовета не наблюдалось никаких длинновременных задержек, что является важной проблемой при создании $p-i$ - n и ЛФД с высоким быстродействием на основе системы $InGaAs/InP$ [14]. Это связано с особенностями гетерограницы Π типа в используемой структуре $p-GaSb-p^0-GaInAsSb-p-GaAlAsSb$. Как видно из схематической зонной диаграммы, приведенной на вставке рис. 1, в такой структуре при приложении запорного напряжения нет условий для накопления дырок на гетерогранице.

В заключение отметим, что в работе впервые создан $p-i$ - n фотодиод с очень высоким быстродействием $\tau = 50$ пс на основе узкозонных твердых растворов $GaInAsSb$ на спектральный диапазон 2–2.4 мкм. Это сравнимо с лучшими результатами, полученными до сих пор для хорошо отработанных $p-i$ - n диодов на основе $GaInAs/InP$ на длину волны 1.3 мкм (см., например, [15]). Такие $p-i$ - n фотодиоды перспективны для работы в приемных модулях ИК-ВОЛС при высоких скоростях передачи информации порядка нескольких гигабит/с, а также могут использоваться для регистрации быстрых процессов в научных исследованиях.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Miyashita T., Manabe T. // IEEE J. Quant. Elect. 1982. V. QE-18. N 10. P. 1432–1450.
- [2] Kanamory T., Sakaguchi S. // Jpn. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. P. 1468–1470.
- [3] Laser Focus, February. 1987, p. 92–98.
- [4] Долгинов Л.М., Дружинина Л.В., Елисеев П.Г., Лапшин А.И., Мильвидский М.Г., Свердлов Б.И. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. С. 703.

- [5] S a n e a u C., S r i v a s t a v a A.H., D e n t a i A.G. et al. // *Elect. Lett.* 1986. N 19. P. 992-993.
- [6] Б а р а н о в А.Н., Д ж у р т а н о в Б.Е., И м е н к о в А.Н., Р о г а ч е в А.А., Ш е р н я к о в Ю.М., Я к о в л е в Ю.П. // *Письма в ЖТФ.* 1986. Т. 12. В. 11. С. 664-668.
- [7] Б а р а н о в А.Н., Д а н и л о в а Т.Н., Д ж у р т а н о в Б.Е., И м е н к о в А.Н., К о н н и к о в С.Г., Л и т в а к А.М., У м а н с к и й В.Е., Я к о в л е в Ю.П.// *Письма в ЖТФ.* 1988. Т. 14. В. 18. С. 1671-1675.
- [8] B o w e r J.E., S r i v a s t a v a A.H., B u r r u s et al. // *Elect. Lett.* 1986. V. 22. P. 137-138.
- [9] А н д р е е в А.И., А ф р а и л о в М.А., Б а р а н о в А.Н., Д а н и л ь ч е н к о В.Г., М и р с а г а т о в М.А., М и х а й л о в а М.П., Я к о в л е в Ю.П.// *Письма в ЖТФ.* 1986. Т. 12. В. 21. С. 1311-1315.
- [10] А н д р е е в И.А., А ф р а и л о в М.А., М и р с а г а т о в М.А. и др. // *Письма в ЖТФ.* 1988. Т.14. В. 11. С. 986-991.
- [11] К о н н и к о в С.Г., У м а н с к и й В.Е., Л о д ы ж и н с к и й И.И. // *Письма в ЖТФ.* 1987. Т. 13. В. 19. С. 1183-1186.
- [12] К о н н и к о в С.Г., С о л о в ь е в В.А., У м а н с к и й В.Е., Ч и с т ь я к о в В.М. // *ФТП.* 1987. Т.21. В. 11. С. 2028-2032.
- [13] M a r g u l i s W. and S i b b e r t W. // *Appl. Phys. Lett.* 1983. V. 42. N 11. P. 975-977.
- [14] F o r r e s t S.R., K i m O.K., S m i t h R.G. // *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 41. P. 95.
- [15] L e e T.P., B u r r u s C.A. et al. // *Electr. Lett.* 1981. V. 17. P. 431-432.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
7 февраля 1989 г.