

Таким образом, в настоящей работе показано, что в процессе формирования активной среды *SPER*-лазера наблюдаются следующие физические процессы: а) предыонизация буферного газа; б) протекание тока по объему разлетающейся плазмы; в) перемешивание паров металла и буферного газа при разлете плазмы; г) протекание плазмохимических реакций в разлетающейся плазме; д) преимущественно столкновительный механизм охлаждения плазмы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Silfvast W.T., Szeto L.H., and Wood O.R., II - Appl. Phys. Lett., 1980, v. 36, p. 615-617.
- [2] Silfvast W.T., Szeto L.H., and Wood O.R., II - Appl. Phys. Lett., 1982, v. 39, p. 212-214.
- [3] Apollonov V.V., Derzhavin S.I., Prokhorov A.M., Sirotkin A.A. - SPIE, 1986, v. 664, p. 291-295.
- [4] Латуш В.Л., Михалевский В.С., Сэм М.Ф. - Оптика и спектроскопия, 1983, т. 34, № 2, с. 214-220.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
25 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
1 апреля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 11

12 июня 1988 г.

ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД С РАЗДЕЛЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ ПОГЛОЩЕНИЯ И УМНОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ $GaInAsSb/GaAlAsSb$

И.А. Андреев, М.А. Афраилов,
А.Н. Баранов, М.А. Мирсагатов,
М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев

В работе [1] нами сообщалось о первых результатах по исследованию лавинного умножения фототока в гетероструктурах на основе многокомпонентных твердых растворов $GaInAsSb/GaAlAsSb$. Было показано, что такие материалы перспективны для создания лавинных фотодиодов, работающих в спектральном диапазоне 1.6-2.5 мкм, представляющем интерес, например, для задач волоконно-оптической связи третьего поколения [2].

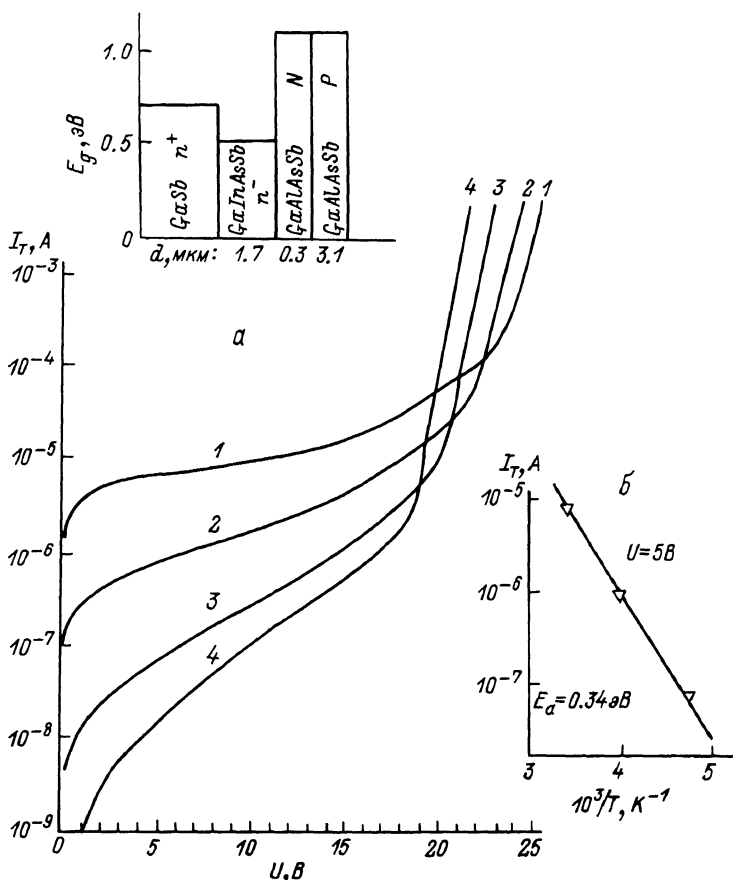


Рис. 1. Обратная ветвь ВАХ ЛФД с разделенными областями поглощения и умножения на основе $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при различных температурах: T, K : 1 - 296, 2 - 253, 3 - 213, 4 - 173. На врезках показано: а - распределение ширины запрещенной зоны по координате в структуре ЛФД, б - температурная зависимость обратного темного тока при $U_{асп} = 5 \text{ В}$.

В [1] было установлено, что отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов в твердых растворах GaInAsSb $\beta/\alpha \approx \approx 5-10$, и было достигнуто значение коэффициентов умножения $M = = 10-20$ при комнатной температуре и 50-100 при температуре жидкого азота. Однако большой темновой ток в гетероструктурах $n\text{-GaInAsSb-p-GaAlAsSb}$ в предпробойной области, опреде-

ляемый механизмами примесного и межзонного туннелирования в узкозонном материале, затрудняет создание эффективных ЛФД, работающих при комнатной температуре.

Для снижения туннельного тока в лавинных фотодиодах на основе узкозонных материалов в работе [3] была предложена структура с разделенными областями поглощения в узкозонном и умножения в широкозонном материале. Такая конструкция была впервые реализована в ЛФД на основе $InGaAs/InP$ для спектрального диапазона 1–1.6 мкм [3, 4].

Расположение области умножения с р-п-переходом в широкозонном материале позволяет снизить величину электрического поля на гетерогранице с узкозонной областью и избежать значительных туннельных токов в этой области, когда в области умножения достигается лавинный пробой. Для этого, как показано в [5], необходим строгий выбор соответствующих концентраций носителей заряда в слоях и их толщин [5].

Предложенная в [3] конструкция была использована в настоящей работе для создания лавинного фотодиода на основе твердых растворов $GaInAsSb/GaAlAsSb$. Узкозонная область поглощения была выполнена из твердого раствора $n-GaInAsSb$ ($E_g = 0.52$ эВ), а широкозонный п-р-переход располагался в $GaAlAsSb$ непрямозонного состава ($E_g = 1.2$ эВ), на расстоянии 0.3 мкм от гетерограницы. Структуры изготавливались методом ЖФЭ на подложке $GaSb$ п-типа. ЛФД были выполнены в виде меза-диодов с диаметром чувствительной площадки $\phi \approx 280$ мкм. Концентрация носителей заряда в узкозонной области составляла $5-7 \cdot 10^{15}$ см⁻³, в широкозонной области — $7 \cdot 10^{16}$ см⁻³, р+-слой $GaAlAsSb$ был легирован Ge до концентрации $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Толщины слоев указаны на рис. 1.

Исследование вольт-амперных характеристик ЛФД в интервале температур 296–78 К показало, что температурный коэффициент

напряжения пробоя был положителен, $\gamma = \frac{\Delta U_B}{U_B} \frac{1}{\Delta T} > 0$; $\gamma = 2 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$,

то есть пробой носил лавинный характер (см. рис. 1). Величина напряжения пробоя определялась широкозонным материалом и составляла 21–24 В при $T = 296$ К и 18–20 В при 78 К. Значение плотности темного тока при $U = 0.5 U_B$ составило $j \approx 1-2 \cdot 10^{-2} \frac{A}{\text{см}^2}$, что в 2–3 раза ниже, чем в структурах ЛФД обычного типа, описанных нами ранее в [1].

Темновой ток на участке напряжений 5–12 В определялся генерацией-рекомбинацией в слое узкозонного материала. Энергия активации составляла на этом участке $E_a = 0.34$ эВ, как показала температурная зависимость обратного тока (рис. 1,б). Величина электрического поля в ОПЗ широкозонного п-р-перехода составляла $E = 3.5 \cdot 10^5$ В/см и падала до величины $8 \cdot 10^4$ В/см на границе с узкозонным слоем. Поле проникало в узкозонный слой при напряжении на структуре около 4–5 В, что хорошо было видно по ступ-

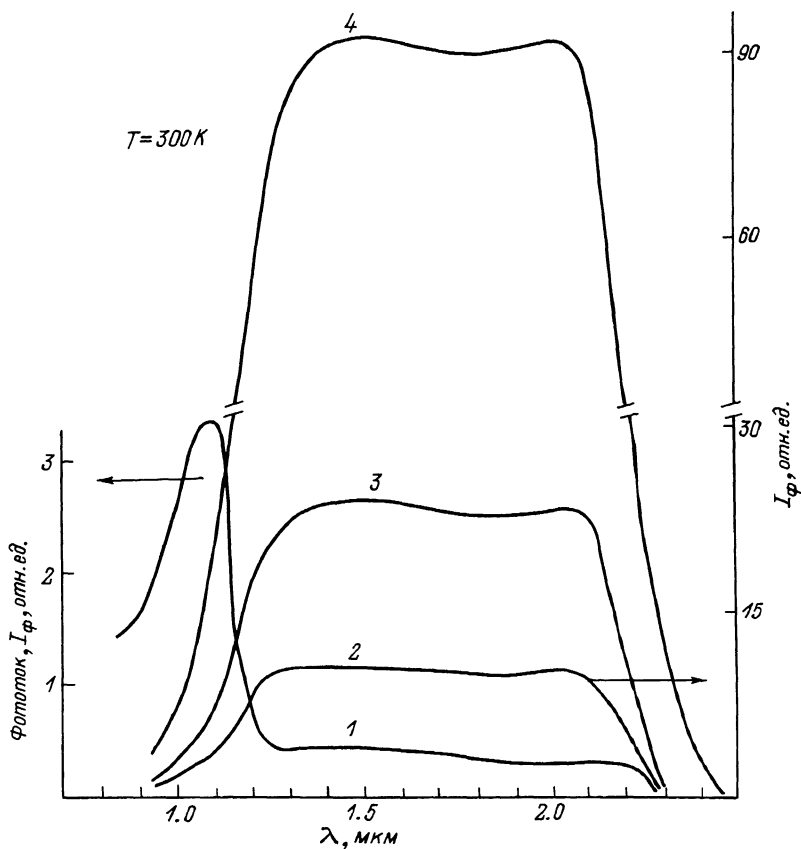


Рис. 2. Спектральное распределение фототока в лавинном фотодиоде $GaInAsSb/GaAlAsSb$ при различных обратных напряжениях. $T = 296$ К. U , В : 1 - 0, 2 - 5, 3 - 10, 4 - 20.

пленке на обратной ветви ВАХ при освещении. Заметное умножение фототока наблюдалось уже при $U \geq 6$ В. По оценкам значение поля для начала заметного туннелирования в широкозонном материале составляет $E \sim 10^6$ В/см, в узкозонном - свыше $2.5 \cdot 10^5$ В/см.

Спектральное распределение фоточувствительности при различных напряжениях представлено на рис. 2. Поскольку освещение ЛФД проводилось через широкозонный р-слой, фоточувствительность при нулевом смещении определялась главным образом $GaAlAsSb$ (кривая 1). С ростом напряжения свыше 4 В, когда электрическое поле проникало в узкозонный слой, спектр фототока имел вид, характерный для гетероструктуры, и его длинноволновый и коротковолновый

слады соответствовали значениям ширины запрещенной зоны широкозонного и узкозонного материалов. Наблюдалось заметное увеличение фоточувствительности, соответствующее коэффициентам умножения при комнатной температуре 30–50. При $T = 78 \text{ K}$ в области больших напряжений $M = 200\text{--}500$.

Полученные результаты по снижению туннельной компоненты обратного тока в предпробойной области и реализация лавинного типа пробоя в наших структурах связаны не только с разделением областей поглощения и умножения, но также с использованием непрямозонного материала $GaAlAsSb$ в области умножения, что существенно уменьшает вероятность туннелирования по сравнению с прямозонным материалом с той же шириной запрещенной зоны за счет участия в процессе фононов [6]. Отметим, что при этом условии требование к величине концентрации носителей заряда в области умножения может быть менее жестким, чем в [3, 5]. Об этом свидетельствуют также результаты исследования вольт-амперных характеристик диодных структур $GaAlAsSb$ того же состава, специально нами изготовленных в качестве эталонных.

Дальнейшее улучшение таких ЛФД требует оптимизации ряда параметров структуры, среди которых концентрация носителей заряда в широкозонном слое, толщины слоев, определяющие величину электрического поля на гетерогранице. Важно снизить значение поля до величины $F \lesssim 6 \cdot 10^4 \text{ В/см}$, чтобы избежать дополнительного умножения в слое поглощения. Кроме того, для снижения коэффициента избыточного шума возможно использование для создания области умножения „резонансные” или квазирезонансные составы широкозонного твердого раствора $GaAlAsSb$ (с $E_g \approx A_0$), позволяющие получить более высокие значения коэффициентов ионизации дырок и электронов [7].

В заключение авторы благодарят И.Н. Ясневич и А.А. Пахомова за полезные обсуждения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н., Мирсагатов М.А., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 8, с. 481–486.
- [2] Дианов Е.М. – Изв. вузов, Радиоэлектроника, 1983, т. 26, № 5, с. 27–35.
- [3] Susa N., Nakagome H., Mikamov O., Ando H., Kanbe H. – IEEE J. Quant. Electr., 1980, QE-16, N 8, p. 864–869.
- [4] Ando H., Yamaguchi Y., Nakagome H., Susa N., Kanbe H. – IEEE J. Quant. Electr., 1981, QE-17, N 2, p. 250–254.

- [5] Takahashi Y., Kawashima M., Horikoshi J. - Jap. J. Appl. Phys., 1980, v. 19, N 4, p. 693-701.
- [6] Клейнман Л. Туннелирование в полупроводниках с участием фононов. В кн.: Туннельные явления в твердых телах (пер. с англ.), М.: Мир, 1973, с. 175-186.
- [7] Корольков В.И., Михайлова М.П. - ФТП, 1983, т. 17, в. 4, с. 569-582.

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

Поступило в Редакцию
15 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 11

12 июня 1988 г.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ
НА ОДИНОЧНЫХ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО
СОЕДИНЕННЫХ ТОРЦЕВЫХ
ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ПЕРЕХОДАХ

А.Л. Гудков, В.Н. Лаптев,
С.Б. Розанов

1. В супергетеродинных приемниках миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СММ) диапазонов для повышения чувствительности используются охлаждаемые преобразователи частоты [1]. Преобразователи на джозефсоновских переходах (ДП) с внешним гетеродином способны, в принципе, усиливать сигнал, переносимый на промежуточную частоту (ПЧ), при собственной однополосной шумовой температуре около $20 T$, где T - физическая температура ДП [2, 3]. Использование цепочек из одинаковых последовательно соединенных ДП расширяет динамический диапазон приемника. В данной работе изложены результаты исследования преобразователя частоты диапазона 2.2 мм с внешним гетеродином на торцевых ДП из тугоплавких материалов и цепочках из них. Ранее такие ДП и цепочки использовались в детекторном приемнике диапазона 4-8 мм [4, 5]. Работы по преобразователям частоты с внешним гетеродином на торцевых ДП авторам неизвестны.

2. Торцевые ДП с непосредственной проводимостью $Nb/\alpha-Si/Nb$ с площадью $S \lesssim 1$ мкм² и цепочки длиной 0.2 мм из 11 одинаковых ДП изготавливались на кремниевых пластинах толщиной $t = 0.4$ мм по методике, подробно описанной в [5, 6]. Значения нормального сопротивления ДП R_N и их характеристического напряжения $V_C = I_C R_N$ (I_C - критический ток) указаны в таблице. Емкость переходов $C \lesssim 0.01$ пФ, так что вольт-амперные характеристики (ВАХ) как одиночных ДП, так и цепочек не имеют гистерезиса. ДП данного типа не меняют параметров при многократных охлаждениях до ге-