

появлению большего числа спектральных линий и их некоторому смещению. При этом большее число спектральных линий, лежащих в „красной“ области, приводит к снижению яркости свечения в „зеленой“ области спектра МДПМ-структуры.

Таким образом, проведенные исследования ВЯХ и спектральных зависимостей излучения тонкопленочных МДПМ- и МДПМ-структур с активным слоем  $ZnS : TbF_3$  позволили установить: 1) структуры с керамическим диэлектриком имеют значительно более низкие пороговые напряжения; 2) ВЯХ этих структур более пологие при относительно больших яркостях свечения; 3) спектральные зависимости у МДПМ-структур характеризуются большим числом полос и некоторым их смещением, что связано с особенностями кристаллической структуры пленок  $ZnS : TbF_3$ , выращенных на керамике.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] М а н у э л ь Т., Л а й м а н Д. // Электроника. 1987. № 11. С. 19-33.
- [2] Yoshio Sano, Keijio Nunomura, Nobuyoshi Koyama e.a. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1986. ED-33. N 8. P. 1155-1158.
- [3] Ф е о ф и л о в П.П. // Опт. и спектр. 1961. Т. 10. № 1. С. 142.

Институт полупроводников  
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию  
25 марта 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

06.2; 06.3

МАЛОШУМЯЩИЕ ЛАВИННЫЕ ФОТОДИОДЫ  
С РАЗДЕЛЕННЫМИ ОБЛАСТЯМИ ПОГЛОЩЕНИЯ  
И УМНОЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЛАСТИ СПЕКТРА 1.6-2.4 МКМ

И.А. А н д р е е в, М.А. А ф р а и л о в,  
А.Н. Б а р а н о в, Н.Н. М а р ь и н с к а я,  
М.А. М и р с а г а т о в, М.П. М и х а й л о в а,  
Ю.П. Я к о в л е в

В последние годы для использования в ВОСПИ привлекает внимание спектральный диапазон 2-4 мкм [1, 2]. Интерес к этому диапазону связан с возможностью получения более низких оптических потерь ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$  дБ/км) в волокнах на основе флюоридных стекол, чем в кварцевых волокнах на длине волны  $\lambda = 1.55$  мкм [1]. Обнадеживающие результаты по получению волокон для ИК-диапазона [2] стимулируют также создание элементной базы - источников

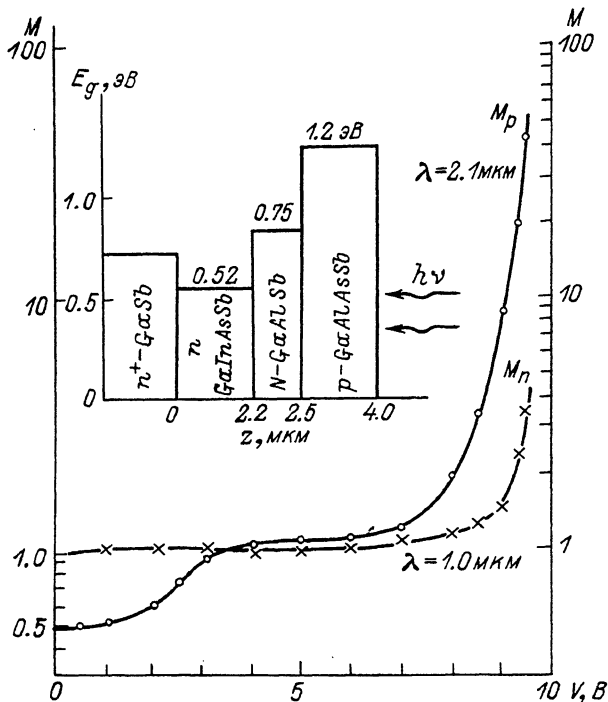


Рис. 1. Зависимости коэффициентов умножения носителей заряда от обратного напряжения в ЛФД РПУ с областью умножения  $\text{Ga}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{Sb}$  „резонансного“ состава при освещении монохроматическим светом с различной длиной волны. На врезке рис. 1 показана схематически структура ЛФД РПУ с „резонансным“ составом в области умножения.

света и фотоприемников для длинноволновых оптических систем передачи. Однако в литературе имеется чрезвычайно мало работ, посвященных разработке быстрореагирующих неохлаждаемых фотоприемников для диапазона 2–4 мкм (см., например, [3–5]).

Ранее мы сообщали о создании и исследовании первых лавинных фотодиодов (ЛФД) для области спектра 1.6–2.4 мкм на основе многокомпонентных твердых растворов  $\text{A}^3\text{B}^5 \text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ , в том числе с разделенными областями поглощения и умножения [6]. Были получены коэффициенты умножения  $M = 20\text{--}30$  при  $T = 300$  К, и реализован лавинный характер пробоя в таких ЛФД.

Перспектива использования ЛФД в системах ВОСП связана, в первую очередь, с проблемой избыточных шумов [7]. Известно, что избыточный шум ЛФД зависит от отношения коэффициентов ионизации дырок и электронов  $k = \beta/\alpha$ , при этом шумы минимальны, если  $k \gg 1$  или  $k \ll 1$  [8].

Было показано в [9], что в твердых растворах  $\text{GaAlSb}$ , для которых выполнено условие „резонанса“ зон  $E_g \approx \Delta_0$  ( $\Delta_0$  – величина

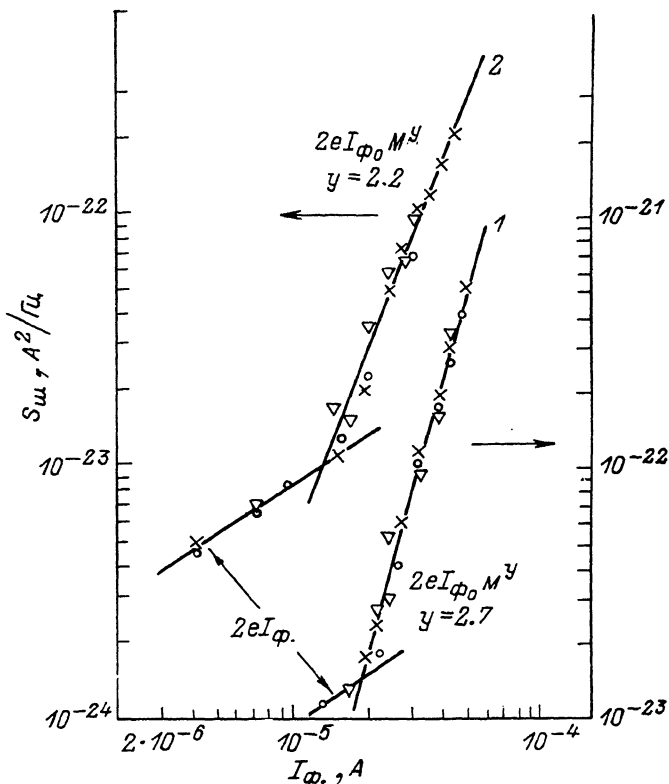


Рис. 2. Зависимости спектральной плотности мощности шума  $S_{ш}$  от величины фототока для двух типов исследованных ЛФД: 1 - ЛФД 2 (область умножения в твердом растворе  $Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$ ,  $x = 0.34$ ); 2 - ЛФД 3 (область умножения в твердом растворе  $Ga_{1-x}Al_xSb$ ,  $x = 0.04$ ).

спин-орбитального расщепления валентной зоны), может быть достигнуто высокое отношение коэффициентов ионизации ( $\beta/\alpha > 30$  при  $T = 300$  К). При этом реализуется практически монополярное умножение дырками.

Нами были изготовлены структуры ЛФД с разделенными областями поглощения и умножения (ЛФД РПУ) [10], в которых область поглощения была выполнена из твердого раствора  $GaInAsSb$  ( $E_g = 0.52$  эВ), а область умножения из твердого раствора  $Ga_{1-x}Al_xSb$  „резонансного” состава ( $x = 0.04$ ,  $E_g = \Delta_0 = 0.76$  эВ). Поверх этого слоя наращивался твердый раствор  $Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$  ( $x = 0.34$ ,  $E_g = 1.2$  эВ), который обеспечивал эффективный ввод излучения в структуру.

ЛФД РПУ были изготовлены методом ЖФЭ на подложках п- $GaSb$  (111) по методике, описанной ранее в [6]. Концентрация носителей заряда, определенная по вольт-фарадным измерениям,

Тип ЛФД	Область поглощения	Область умножения	$F(M)=M^n$ , $n$	$F(M)$ при $M=10$	$\beta/\alpha$
1	$n-GaInAsSb$	$n-GaInAsSb$	0.5	3.2	7
2	$n-GaInAsSb$	$n-Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$ $x=0.34$	0.7	5.0	3
3	$n-GaInAsSb$	$n-Ga_{1-x}Al_xSb$ $x=0.04$	0.2	1.6	60

составила в области поглощения  $n = (5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а в области умножения  $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Толщины областей и положение гетерограницы относительно р-п перехода показаны на вставке рис. 1. Диаметр мезодиодов составил 260 мкм.

Были исследованы лавинное умножение фототока, ВАХ, спектры фоточувствительности, быстродействие и шумовые характеристики ЛФД. Напряжение пробоя таких структур составляло 10-12 В, а коэффициенты умножения лежали в интервале  $M = 30-45$  при  $T = 300 \text{ К}$ . Зависимость умножения от длины волны указывала на преимущественное умножение дырками (рис. 1). Спектральные характеристики ЛФД были аналогичны описанным в [6] и имели плато в области 1.3-2.1 мкм. Квантовая эффективность в области плато составила 0.6 элект./фотон. Быстродействие ЛФД, измеренное при освещении через световодное волокно импульсами света полупроводникового лазера с  $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ , было не хуже 0.5-1.0 нс.

Измерения шумовых характеристик проводились с помощью измерителя коэффициента шума Х5-30 в режиме градуировки генераторов шума на частоте 3 МГц в полосе 0.3 МГц. Освещение структур производилось полупроводниковым лазером ИЛПН-206 с  $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ , что обеспечивало дырочную инжекцию в область умножения.

Было проведено сравнительное исследование шумовых характеристик трех типов разработанных нами ЛФД: 1 - на основе гетероструктуры  $p-GaInAsSb/p-GaAlAsSb$ , в которой области поглощения и умножения лежали в  $p-GaInAsSb$  [11]; 2 - ЛФД РПУ с областью поглощения  $p-InGaAsSb$  и областью умножения в твердом растворе  $Ga_{1-x}Al_xAs_ySb_{1-y}$  ( $E_g = 1.2 \text{ эВ}$ ,  $x = 0.34$ ) [6]; 3 - ЛФД РПУ с областью умножения в твердом растворе "резонансного" состава  $Ga_{1-x}Al_xSb$  ( $x = 0.04$ ,  $E_g = 4.0 = 0.76 \text{ эВ}$ ).

Зависимость спектральной плотности мощности шума  $S_{ш}$  от коэффициента умножения фототока дается выражением [8]:

$$S_{ш}(M) = 2eI_{\phi_0}M^2F(M), \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона,  $I_{\phi_0}$  - инициирующий фототок,  $F(M)$  - коэффициент избыточного шума (шум-фактор),  $M$  - коэффициент умножения фототока ( $M = I_{\phi}(V)/I_{\phi_0}$ ).

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости  $S_{ш}(I_{ф})$  для ЛФД 2 и ЛФД 3. По наклонам кривых в области резкого роста  $S_{ш}(I_{ф})$  был определен вид зависимости  $F(M)$  и определены значения  $F(M)$  при  $M = 10$ , а также отношение коэффициентов ионизации дырок и электронов в трех типах структур (см. таблицу).

Как и следовало ожидать, самое низкое значение  $F = 1,6$  получено для ЛФД РПУ с „резонансным” составом в области умножения. Отметим для сравнения, что в  $Ge$  ЛФД  $F = 8-9$  ( $\beta/\alpha \approx 2$ ), а в ЛФД РПУ  $InGaAs/InP$   $F = 5,9$  ( $\beta/\alpha = 2-3$ ) при  $M = 10$  (см., например, [13]). В лавинном гетерофотодиоде 1 типа получено  $\beta/\alpha = 7$ , что хорошо согласуется с результатами определения коэффициентов ионизации по коэффициентам умножения фототока в твердых растворах  $GaInAsSb$  [12]. Для ЛФД РПУ 3 типа получено наиболее высокое отношение коэффициентов ионизации  $\beta/\alpha = 60$ .

Заметим, что недавно в работе [14] была проведена теоретическая оценка пороговых характеристик приемного оптического модуля с использованием ЛФД РПУ на основе  $GaAlAsSb / GaInAsSb$  на длине волны  $\lambda = 2,5$  мкм для скоростей передачи 0,66–2,0 Гбит/с. Авторы [14] отмечают, что несмотря на большие ожидаемые темновые токи в этих ЛФД по сравнению со структурами на основе  $GaInAs/InP$  может быть достигнута хорошая минимальная детектируемая мощность (например,  $-41,6$  дБм при  $T = 300$  К и скорости передачи 2 Гбит/с). Это обусловлено высоким отношением коэффициентов ионизации  $\beta/\alpha$  (авторы [14] использовали в расчетах  $\beta/\alpha = 30$  по данным [9]). Использование термоэлектрического охлаждения, как отмечено в этой работе, позволит улучшить пороговые характеристики ЛФД на основе  $GaInAsSb/GaAlAsSb$  даже по сравнению с оптимизированным ЛФД на основе  $GaInAs/InP$ , работающим на длине волны  $\lambda = 1,5$  мкм.

Таким образом, в результате проведенной работы созданы малошумящие ЛФД с разделенными областями поглощения и умножения на основе  $GaInAsSb/GaAlAsSb$ , перспективные для использования их в системах ИК-ВОСПИ III поколения в диапазоне до 2,5 мкм.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Lucas J. // Infrared Phys. 1985, 25 (1, 2).
- [2] Laser Focus, february 1987. P. 92–98.
- [3] Bower J.E., Srivastava A.K. et al. // Electr. Lett. 1986. V. 22. N 3. P. 137–139.
- [4] Mosley A.J., Scott M.D. et al. // Electr. Lett., 1986. V. 22. N 22. P. 1206–1207.
- [5] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. С. 1311–1315.
- [6] Андреев И.А., Афраилов М.А., Баранов А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 986–991.

- [7] К о р о л ь к о в В.И., М и х а й л о в а М.П. // ФТП. 1983. Т. 17. № 4. С. 569-582.
- [8] M s I n t y r e // IEEE Trans. El. Dev. 1966. ED-13. P. 164.
- [9] Ж и н г а р е в М.З., К о р о л ь к о в В.И., М и х а й л о в а М.П. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 24. С. 1487-1490.
- [10] S u s a N., N a k a g o m e H., M i k a m i O., A n d o H., K a n b e H. // IEEE J. Quant. Electr. 1980. QE-16. N 8. P. 864-869.
- [11] А н д р е е в И.А., А ф р а и л о в М.А., Б а р а н о в А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 8. С. 481-486.
- [12] А н д р е е в И.А., А ф р а и л о в М.А., Б а р а н о в А.Н. и др. В сб.: Полупроводники и гетеропереходы. Таллин, 1987. С. 51-53.
- [13] Техника оптической связи. Фотоприемники. М.: Мир, 1988. 526 с.
- [14] B e n o i t J., B o u l o u M., S o u l a g e G., J o u l l i e A., M a n i H. // J. Opt. Commun. 1988. V. 9. P. 55-58.

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

Поступило в Редакцию  
6 июня 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

04; 09

НАГРЕВ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА,  
УДЕРЖИВАЕМОГО НЕОДНОРОДНЫМ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ

В.П. К о в а л е н к о

Известно, что усредненная по времени сила, действующая на заряд в слабо неоднородном высокочастотном поле, не равна нулю и направлена в сторону убывания амплитуды поля [1-3]. Заряд выталкивается из поля, причем эта выталкивающая сила (сила Миллера) при достаточно плавном изменении в пространстве амплитуды ВЧ поля носит потенциальный характер. Последнее, в частности, означает, что заряд, влетающий в рассматриваемое поле, отражается им упруго, без изменения энергии.

Взаимодействие неоднородных ВЧ полей с частицами играет важнейшую роль в плазме [4, 5], причем пространственные градиенты амплитуд могут быть весьма значительными. Большие градиенты достигаются и в случае возбуждения переменных полей современными мощными СВЧ устройствами.