

## Смеситель оптических и СВЧ частот на основе фотодетектора ЛФД-2а

В.Ф. Захарьяш

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Аннотация.* Создан смеситель оптических частот (соответствует длине волны 0,85–1,2 мкм) и СВЧ частот (до 200 ГГц) на основе ЛФД-2а. Приводятся предварительные экспериментальные результаты исследования конструкции (далее – МЛФД) состоящей из германиевой структуры ЛФД-2а и отводящего электрода, который выполняет роль антенны для СВЧ поля, помещенного в волновод. С отводящего электрода снимается результирующий сигнал и с его помощью подается оптимизирующее смещение. Исследованы детектирующие и смесительные свойства (МЛФД). Показано сохранение высокой чувствительности по детектированию как лазерного излучения, соответствующая фотодиоду ЛФД-2а, так и СВЧ-излучения. Быстродействие созданного смесителя МЛФД превышает 200 ГГц. Показана работоспособность устройства по смешению лазерного и СВЧ излучений.

*Ключевые слова:* фотоприемник, смеситель, лазер, СВЧ-излучение.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе решения разнообразных задач в оптическом диапазоне, связанных с созданием приборов, необходима разработка различных элементов. Это относится, прежде всего, к проблеме приема и обработки информации в том числе, например, при создании спектральных приборов или синтезаторов частот,

В настоящее время быстрыми темпами осуществляется освоение всего оптического диапазона длин волн при разрешающей способности  $10^{-12}$ – $10^{-15}$ . Для передачи частотных характеристик из одной области диапазона в другую требуются смесительные нелинейные элементы работоспособные в возможно более широком диапазоне частот и имеющие высокое быстродействие. Такие работы проводились ранее и нами [1–2]. В этих работах исследовались ДБШ<sup>10</sup> и МОМ<sup>11</sup> диоды. Однако эти диоды практически оказались или недостаточно долгоживущими (МОМ диоды) или с недостаточной чувствительностью (ДБШ – за счет экранировки контактной площадкой лазерного излучения) на длинах волн оптического излучения от 0,85 до 1,2 мкм.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

В области 0,85–1,2 мкм существует много различных фотоприемников, выполненных на разнообразных материалах и с хорошим быстродействием (до нескольких десятков Гигагерц) в их числе ЛФД-2а и более продвинутой разработки НИИ «ПОЛЮС» такие как ЭГС11...70, и ФПУ-03...32. Однако при необходимости частотной компенсации свыше 40 ГГц [3] возникают существенные проблемы, связанные с необходимостью использования

дополнительных оптических устройств, которые делают системы более громоздкими.

Хорошо известны лавинно пролетные фотодетекторы на основе *InGaAs/Si*, которые имеют быстродействие до 400 ГГц [4, 5], однако они применяются для детектирования в основном в цифровой области передачи информации в области 1–1,6 мкм.

Было решено проверить быстродействие ЛФД-2а на частотах СВЧ. Для этого с фотоприемника было удалено защитное стекло (для лучшего прохождения СВЧ) и на него был подан сигнал СВЧ (порядка 40 ГГц). Удалось зафиксировать продетектированный сигнал модуляции на уровне -100 мкВ.

Так как кванта СВЧ недостаточно для переброса носителей заряда из зоны проводимости Ge в валентную зону, то было предположено, что этот сигнал появляется благодаря наведению СВЧ поля на отводящий проводник фотодетектора, который играл роль приемной антенны.

Однако известно, что антенна в виде провода, обладает диаграммой направленности [6]

$$E(\theta) = E_0 \sin \theta (\sin x/x), \quad x = 2\pi L (1 - \cos \theta) / \lambda, \quad (1)$$

где  $E(\theta)$  – наведенное поле в антенне,  $L$  – длина антенны, а  $\lambda$  – длина волны излучения. Главный лепесток антенны определяется углом в виде

$$\theta_m = \arccos(1 - 0,37/L), \quad (2)$$

то есть для максимального наведения поля антенна должна располагаться вдоль вектора электрического поля.

Как известно в ЛФД-2а выводы расположены планарно, поэтому работоспособность этого фотоприемника ограничена 3 ГГц из-за существующих емкостей [5].

Была предложена идея создать конструкцию, сочетающую свойства ЛФД-2а и конструкцию, применяющуюся для МОМ и

<sup>10</sup> ДБШ – диоды с барьером Шоттки

<sup>11</sup> МОМ – диод со структурой металл-окисел-металл

Шоттки диодов [1, 2]. Для этого у ЛФД-2а удаляется отводящий электрод и вместо него используется контактирующая игла.

На *Рис. 1* представлена конструкция, сочетающая в себе такое устройство (далее будем называть его МЛФД).

Кристалл ЛФД-2а перенесен на держатель и изображен *Рис. 2*, который перемещается микровинтом (расположен с обратной стороны). Игла выполнена на съемном разьеме (для возможности ее электрохимического затачивания). В экспериментах применялись иглы из различных материалов: платины, золота, из сплава никель-хром. Заточка игл осуществлялась электрохимическим травлением до диаметра наконечника 1–1,5 мкм. Качество заточки контролировалось под микроскопом. Игла должна быть законтачена в то место ЛФД, где был отводящий проводник ЛФД-2а. При этом сама игла выполняет роль приемной антенны СВЧ излучения, нагруженной на переход ЛФД-2а. Иглы из платины и золота обладают высокой пластичностью и при малейшей механической вибрации контакт является неустойчивым, тем более что длина иглы составляет значительную величину (7–10 мм). За счет пружинящих свойств иглы из

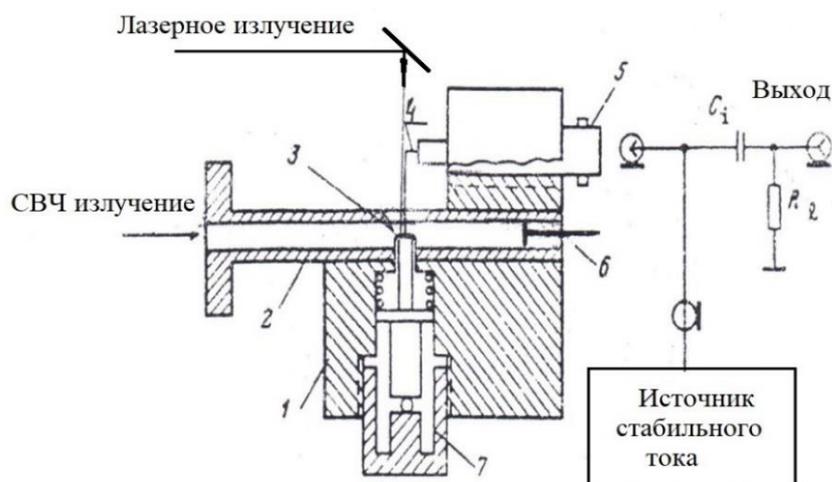
сплава никель-хром удалось обеспечить хорошую устойчивость контакта с сохранением радиотехнических свойств.

Принципиальная схема установки, на которой исследовались свойства устройства МЛФД, изображена на *Рис. 3*.

Во-первых, была проверена работоспособность МЛФД в различных режимах по постоянному току и снята вольтамперная характеристика. Оказалось, что была сохранена как характеристика лавинного усиления, так и работоспособность МЛФД на прямой области смещения. Поскольку для лазерного излучения МЛФД не отличается принципиально от ЛФД-2а, то и по шумовым и характеристикам преобразования они эквивалентны.

Во всех дальнейших экспериментах для снижения электрических и термических нагрузок МЛФД использовался без какого-либо смещения.

Во-вторых, была проверены работоспособность МЛФД на СВЧ частотах как детектора, а затем как смесителя. На *Рис. 4* представлена осциллограмма протестированного СВЧ сигнала (1 кГц) и сигнала лазера на 0,85 мкм (200 Гц от прерывателя).



*Рис. 1.* Смесительная головка с МЛФД: 1 – корпус головки, 2 – волновод, 3 – германиевый кристалл ЛФД-2а, 4 – контактная игла, 5 – выходной разъем, 6 – подстроечный поршень, 7 – микрометрический винт

Из *Рис. 4* можно оценить вольт-ваттную чувствительность МЛФД. Уровень СВЧ сигнала составлял ~5 мВт, что приводит к оценке по чувствительности ~40 В/Вт (для небольших мощностей).

Затем осуществлялось смешение частот двух СВЧ сигналов стандартных генераторов Г4-141 и Г4-142. При смешении второй гармоники Г4-141 и основной гармоники Г4-142 был получен сигнал биений более 60 дБ над уровнем шума (в полосе 100 кГц).

При смешении пятой гармоники Г4-141 и третьей гармоники Г4-142 (на уровне 200 ГГц, т.е. достигался восьмой порядок нелинейности) был получен перестраиваемый в широких пределах сигнал на уровне 30 дБ. К сожалению,

генераторы Г4-141 и Г4-142 имеют довольно широкую линию излучения (20–40 кГц) и при умножении частоты их спектры значительно уширяются (пропорционально коэффициенту умножения), что приводит к уширению спектра биений и падению амплитуды и ограничивает обнаружительную способность по быстродействию.

И, наконец, была исследована возможность комплексной работоспособности МЛФД по смешению лазерного и СВЧ излучений. Для этого использовалось излучение полупроводникового лазера в режиме СВЧ модуляции его частоты с частотой модуляции 350 МГц. Было получено несколько спектральных оптических составляющих. На МЛФД одновременно

подавались также излучения двух СВЧ генераторов (Г4-141) и использовались биения этих СВЧ генераторов.



Рис. 2. Кристалл ЛФД-2а на держателе с контактирующей иглой

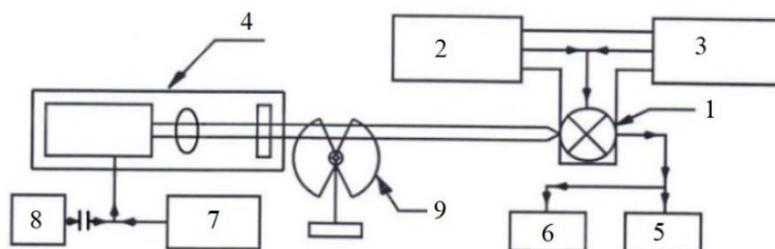


Рис. 3 Блок схема установки для исследования МЛФД: 1 – МЛФД; 2, 3 – генераторы СВЧ (Г4-141 и Г4-142); 4 – трехзеркальный лазер; 5 – осциллограф; 6 – анализатор спектра (N9322c); 7 – источник тока; 8 – модулятор ВЧ; 9 – прерыватель

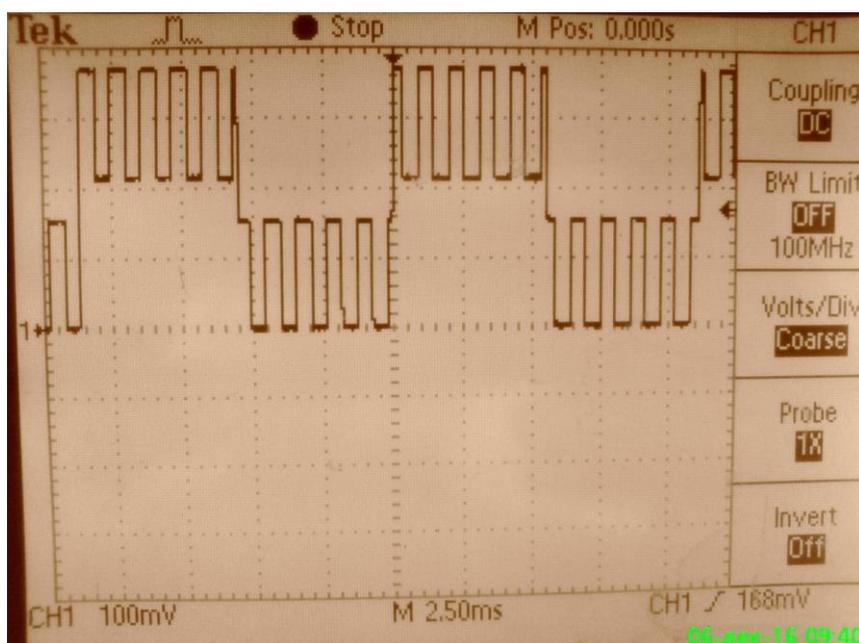


Рис. 4. Вид продетектированного сигнала с МЛФД

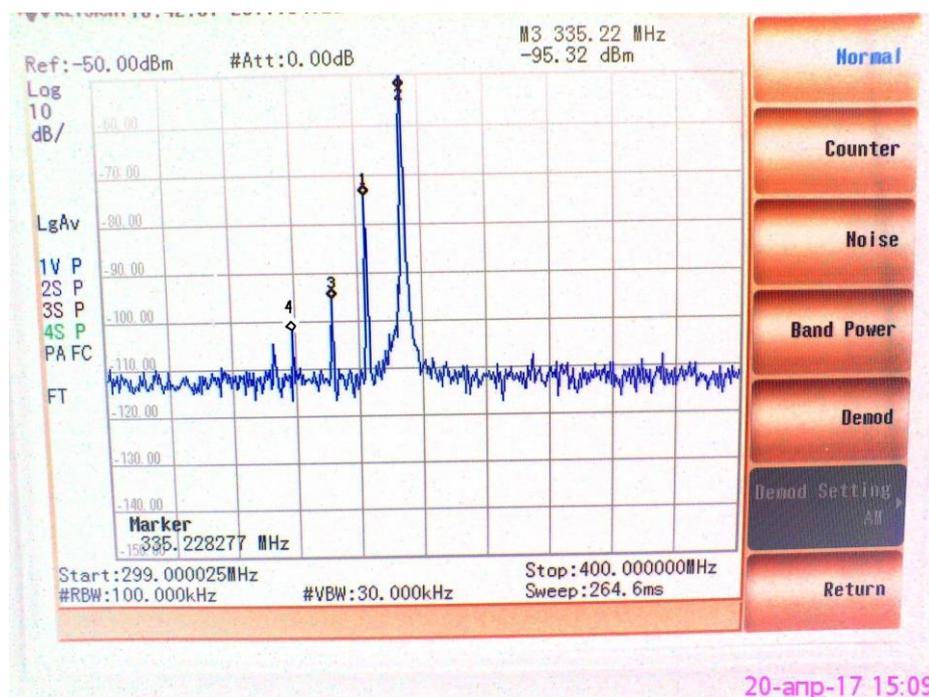


Рис. 5. Вид спектров сигналов на анализаторе

На Рис. 5 приведен вид спектра сигналов используемых и получаемых в этом эксперименте. Сигнал, помеченный маркером 1 соответствует сигналу биений между модами лазера. Сигнал, помеченный маркером 2 соответствует сигналу биений двух СВЧ генераторов, который можно было перестраивать, изменяя частоту любого СВЧ генератора. Сигнал с маркером 3 соответствует биениям  $2F_m - F_{\text{СВЧ1}} - \text{СВЧ2}$ , а сигнал, помеченный маркером 4 соответствует биениям  $2F_{\text{СВЧ1-СВЧ2}} - F_m$ , где  $F_m$  – межмодовая частота лазера, а  $F_{\text{СВЧ1-СВЧ2}}$  – разностная частота двух СВЧ генераторов.

На анализаторе присутствовал и сигнал прямой разности частот биений  $F_{\text{СВЧ1-СВЧ2}} - F_m$  (спектрограмма не приводится).

Для проверки достоверности смещения сигналов именно на МЛФД на анализатор спектра были поданы два сигнала от радиогенераторов соответствующих частот и амплитуд, который показал, что не возникает комбинационных сигналов при этих условиях.

Очевидно данное устройство (МЛФД) объединяет два механизма которые дополняют друг друга.

Первый механизм – это механизм фотодетектирования присущий ЛФД-2а и второй механизм, который можно связать со временем пролета электронов через область  $p-n$  перехода [8, 9].

Если приближенно оценить, то

$$qE = mv^2/2; v = (qE/m)^{1/2}; t = L/v,$$

где  $q$  – заряд электрона;  $E$  – напряженность электрического поля СВЧ;  $m$  – масса электрона;

$L$  – толщина слоя перехода; а  $t$  – время пролета электрона сквозь  $p-n$  переход.

Полагая:  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ К}$ ;  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ;  $L = 1 \cdot 10^{-6}$ ;  $E = 1 \text{ В}$ , получим  $t = 1,7 \cdot 10^{-12} \text{ с}$ . То есть порядка 500-600 ПГц.

А поскольку игла МЛФД выполняет роль электрода, по которому протекают все токи нелинейного  $p-n$  перехода, то происходит смешение сигналов.

Конечно, вышеуказанный результат не учитывает свойств германия, степени его легирования и других технологических и конструкционных особенностей, однако результат показывает достаточно хорошее совпадение.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В заключение можно сказать, что, обладая соответствующей технологической базой (установкой по термокомпрессионной сварке и высокотемпературной пайки) можно создать смесительно-умножительный элемент – МЛФД, обладающий в области 0,8–1,2 мкм уникальными свойствами, позволяющими осуществлять, при определенных условиях, прецизионную спектроскопию в указанной выше оптической области. Для этого необходимо в волноводную вставку на нижней стороне рабочей поверхности волновода припаять полупроводниковую структуру и, осуществив термокомпрессию отводящего проводника, вывести его на изолированную площадку, расположенную на внешней стороне волновода.

Такой МЛФД будет обладать высокой воспроизводимостью и долговечностью при условии защиты его поверхности изолирующим

покрытием. При использовании волоконного ввода лазерного излучения возможно изготовления вышеописанного элемента в вакуумном исполнении.

В дальнейшем планируются исследования по достижению компенсации максимального возможного дефицита частот между двумя одинаковыми полупроводниковыми лазерами и возможности создания генератора СВЧ частот до терагерцового диапазона за счет излучения разностной частоты между лазерами и согласования излучающей антенны (иглы) с волноводом (аналогично работам [9], [10]).

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В.Г. Гольдурту (ИФП СОРАН) за предоставленные фотоприемники ЛФД-2а и А. Рогозину за предоставление анализатора спектра (*Keysight Technologies*).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chepurov, S.V., Klementyev, V.M., Kuznetsov, S.A., Pivtsov, V.S., Zakharyash, V.F. (2004) Experimental Investigation of Schottky Barrier Diodes as Nonlinear Elements in 800-nm-WavelengthRegion. *Applied Physics B*. Vol. 79. № 1, p. 33-38.
- [2] Денисов В.И., Клементьев В.М., Захарьяш В.Ф., Чепуров С.В. Сверхбыстродействующие диоды металл-окисел-металл на контактах W-Ni, Pt-Ti, Pt-W. Приборы и техника эксперимента, 2007. № 4. С. 96 – 102.

- [3] А. Григорьев, А.В.Толстикова, Ю.Н. Навроцкая «Измерение импеданса лавинного фотодиода и его согласование с передающей линией в диапазоне 0.5-1.0 GHz. ЖТФ, 2007, том 77, вып.5.
- [4] SPIE. Vol .3006. Weishu Wu, Aaron R. Hawkins, and John E. Bowers Design of InGaAs/Si avalanche photodetectors for 400GHz gain bandwidth product. p.38-47
- [5] S. Kagawa, T. Kaneda, T. M. Kawa, Y. Banba, and Y. Toyama. Fully ion implanted p+n germanium avalanche photodiodes. *Appl. Phys. Lett.*, Vol.38, № 6, 15 March 1981, p.429-431.
- [6] Гольдштейн Л.Д., Зернов Н.В. Электромагнитные поля и волны. М. «Советское радио»,1956, 639 с.
- [7] Kal, Santiram (2004). "Chapter 2". *Basic Electronics: Devices, Circuits and IT Fundamentals (Section 2.5: Circuit Model of a P-N Junction Diode ed.)*. Prentice-Hall of India Pvt.Ltd. ISBN 81-203-1952-4.
- [8] Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем., изд. 2-е. М.; Мир, 1985. 520 с.
- [9] Evenson K.M., Radford H.E. & Moran M.M., 1971, *Appl. Phys. Lett.* 18, p.426.
- [10] Evenson K.M., Jennings D.A.& Petersen F.R., 1971, *Appl. Phys. Lett.* 44, p.576

**Валерий Федорович Захарьяш** - кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт лазерной физики СО РАН. 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3  
дом. адрес: Новосибирск 630058, ул. Вахтангова, 39, кв. 104  
Телефон: +7 9231544160  
E-mail: [valera@laser.nsc.ru](mailto:valera@laser.nsc.ru)

Статья получена 21.06.2021

## Mixer of Optical and Microwave Frequencies Based on the LFD-2a Photodetector

V.F. Zakharyash

Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

*Abstract.* A mixer for optical frequencies (corresponding to a wavelength of 0.85–1.2  $\mu\text{m}$ ) and microwave frequencies (up to 200 GHz) based on APD-2a has been created. Preliminary experimental results of a study of a structure (hereinafter referred to as MLPD) consisting of an LPD-2a germanium structure and a discharge electrode, which serves as an antenna for a microwave field placed in a waveguide, are presented. The resulting signal is removed from the lead-off electrode and used to supply an optimizing offset. The detecting and mixing properties (MLPD) have been investigated. It is shown that high sensitivity for the detection of both laser radiation, corresponding to the LFD-2a photodiode, and microwave radiation are preserved. The speed of the created mixer MLPD exceeds 200 GHz. The efficiency of the device for mixing laser and microwave radiation is shown.

*Key words:* photodetector, mixer, laser, microwave radiation.

#### REFERENCES

- [1] Chepurov, S.V., Klementyev, V.M., Kuznetsov, S.A., Pivtsov, V.S., Zakharyash, V.F. (2004) Experimental Investigation of Schottky Barrier Diodes as Nonlinear Elements in 800-nm-WavelengthRegion. *Applied Physics B*. Vol. 79. № 1, p. 33-38.
- [2] V. I. Denisov, V. F. Zakhar'yash, V. M. Klement'ev and S. V. Chepurov Very-High-Speed Metal-Oxide-Metal Diodes on W-Ni, Pt-Ti, And Pt-W Contacts. *Instruments and Experimental Techniques*, Volume 50, Number 4, p. 517-523, 2007.
- [3] A. Grigor'yev, A.V. Tolstikov, YU.N. Navrotskaya «Izmereniye impedansa lavinnogo fotodioda i yego soglasovaniye s peredayushchey liniyey v diapazone 0.5-1.0 GHz. ZHTF, 2007, tom 77, vyp.5.
- [4] SPIE. Vol .3006. Weishu Wu, Aaron R. Hawkins, and John E. Bowers Design of InGaAs/Si avalanche photodetectors for 400GHz gain bandwidth product. p.38-47
- [5] S. Kagawa, T. Kaneda, T. M. Kawa, Y. Banba, and Y. Toyama. Fully ion implanted p+n germanium avalanche photodiodes. *Appl. Phys. Lett.*, Vol.38, №6, 15 March 1981, p.429-431.

- [6] Gol'dshteyn L.D., Zernov N.V. Elektromagnitnyye polya i volny. M. «Sovetskoye radio», 1956, 639 s.
- [7] Kal, Santiram (2004). "Chapter 2". Basic Electronics: Devices, Circuits and IT Fundamentals (Section 2.5: Circuit Model of a P-N Junction Diode ed.). Prentice-Hall of India Pvt.Ltd. ISBN 81-203-1952-4.
- [8] Kukhling KH. Spravochnik po fizike: Per. s nem., izd. 2-ye. M.; Mir, 1985. 520 s.
- [9] Evenson K.M., Radford H.E. & Moran M.M., 1971, Appl. Phys. Lett. 18, p.426.
- [10] Evenson K.M., Jennings D.A. & Petersen F.R., 1971, Appl. Phys. Lett. 44, p.576

**Valery Feodorovich Zakharyash** - candidate of technical sciences (PhD), leading researcher, Institute of Laser Physics SB RAS.

630090, Novosibirsk, prosp. Academician Lavrentiev, 13/3

house. address: Novosibirsk 630058, st. Vakhtangov, 39, apt. 104

Phone: +7 9231544160

E-mail: [valera@laser.nsc.ru](mailto:valera@laser.nsc.ru)

The paper has been received on 21/06/2021