

07.2

Исследование деградации параметров субнаносекундного фотоэлектрического модуля при термоциклировании

© В.М. Андреев, В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, Д.А. Малевский, К.К. Прудченко, И.А. Толкачев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vitak.sopt@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 12 декабря 2023 г.

Принято к публикации 13 декабря 2023 г.

Исследована деградация параметров СВЧ-модуля на основе последовательно включенных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей при термоциклировании в диапазоне температур 25–80°C и возбуждении постоянным лазерным излучением из многомодовых оптоволокон с суммарной мощностью 2 W на длине волны 810 nm. При термоциклировании наблюдалось снижение выходной электрической мощности от 953 до 924 mW с уменьшением КПД на 3% в фотовольтаическом режиме с последующей стабилизацией фотоэлектрических параметров СВЧ-модуля.

Ключевые слова: $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотоэлектрический преобразователь, СВЧ-модуль, многомодовое оптоволокно, термоциклирование, электрическая мощность, КПД.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57307.19793

Одним из перспективных направлений науки и техники является разработка элементной базы для создания радиооптических фазированных антенных решеток [1–6]. В такую элементную базу входят, например, мощные СВЧ фотоэлектрические модули (СВЧ ФЭМ), работающие в фотовольтаическом режиме, выполненные на основе эффективных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотодиодов с субнаносекундным быстродействием и высоким КПД (~ 55%) [5]. Современные фотоприемные устройства должны иметь высокое время наработки до отказа в типовом режиме эксплуатации и обеспечивать непрерывную работу при нормальных климатических условиях [7]. В настоящей работе приведены результаты исследования фотоэлектрических характеристик СВЧ ФЭМ из последовательно включенных гетероструктурных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) при термоциклировании и оптическом возбуждении в температурном диапазоне 25–85°C.

Исследованный СВЧ ФЭМ, представляющий собой линейку из 16 последовательно включенных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, смонтированных на микрополосковую линию из AlN, схематически показан на рис. 1, а. Гетероструктурные AlGaAs/GaAs ФЭП были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Структура ФЭП включала в себя тыльный потенциальный барьер $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$; $n\text{-GaAs}$ ($N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)/ $i\text{-GaAs}$ ($N_D \sim 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) — базовый слой с нелегированным i -слоем толщиной 0.3/1.5 μm ; $p\text{-GaAs}$ -эмиттер толщиной 1.0 μm с уровнем легирования $N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; широкозонное окно $p\text{-Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ толщиной 3 μm ($N_A = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$); подконтактный слой $p^+\text{-GaAs}$. На эпитаксиальных пластинах с помощью постростовой технологии формировались чипы ФЭП с контактной

сеткой на фронтальной фоточувствительной поверхности диаметром 300 μm . Фронтальный омический контакт формировался на основе слоев Ag(Mn)/Ni/Au с общей толщиной $h = 3600 \text{ \AA}$, а тыльный — на основе слоев Au(Ge)/Ni/Au, $h = 2000 \text{ \AA}$. Травление меза-структуры осуществлялось на глубину $\sim 10 \mu\text{m}$ с пассивацией боковой поверхности диэлектриком Si_3N_4 .

Для оценки быстродействия $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, использованных для создания СВЧ ФЭМ, применялся импульсный лазер с выходом излучения из 200 μm оптоволокон на длине волны 780 nm длительностью 10 ps на полувысоте амплитуды с частотой следования 71 MHz. Минимальная длительность выходного электрического импульса использованных ФЭП на полувысоте амплитуды составляла $\tau_{0.5} = 630 \text{ ps}$ (рис. 1, б).

При термоциклировании ФЭМ возбуждался постоянным оптическим сигналом из многомодовых 200 μm оптоволокон с использованием сплиттера 1/16, как показано на рис. 1, а. Источником непрерывного оптического сигнала являлся лазер с излучением на длине волны 810 nm с суммарной мощностью 2 W. Источник непрерывного лазерного излучения с оптоволоконным выходом обеспечивал максимальную стабильность длины волны излучения (0.3 nm/K) в диапазоне максимальных значений внешней квантовой эффективности и КПД сверхвысокочастотных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП, использованных в СВЧ ФЭМ. Температурный режим и длительность термоциклирования (рис. 2, а) выбирались исходя из диапазона допустимых рабочих температур эффективного функционирования СВЧ ФЭМ и методики, изложенной в работе [7]. Время нагрева и время охлаждения были равны и суммарно составляли $\sim 30 \text{ min}$. Выдержка СВЧ-модуля на максимальной температуре $T_{\text{max}} = 85^\circ\text{C}$ составляла $\sim 24 \text{ min}$. Процесс

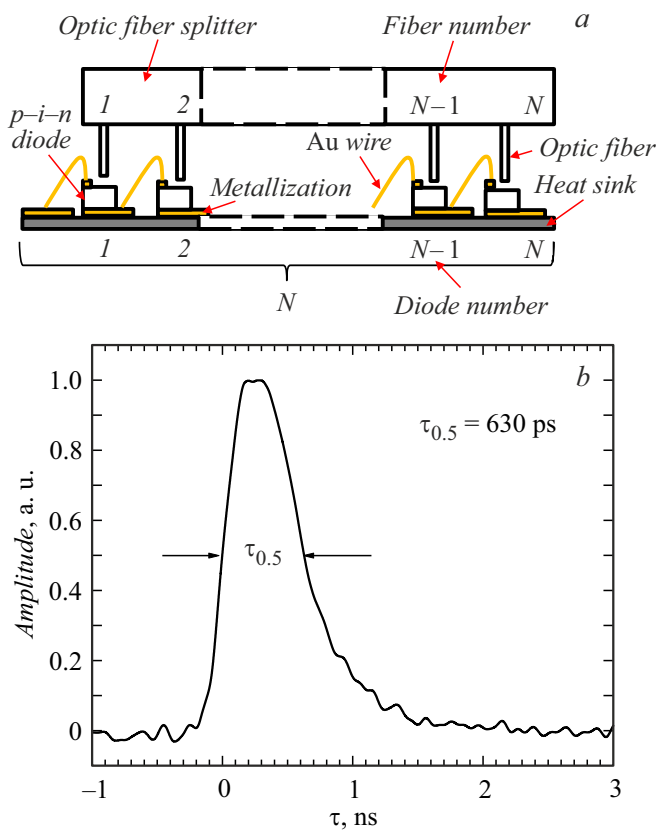


Рис. 1. *a* — схема СВЧ ФЭМ, состоящего из $N = 16$ последовательно включенных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП с диаметром фоточувствительной поверхности $300\ \mu\text{m}$; *b* — импульс фотоответа $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП с диаметром мезы $300\ \mu\text{m}$ на согласованной нагрузке при возбуждении лазерным импульсом длительностью $10\ \text{ps}$ на длине волны $780\ \text{nm}$.

термоциклирования проводился в автоматическом режиме с использованием разработанного термоконтроллера на базе микропроцессорной платы при нормальном давлении и температуре окружающей среды $\sim 25^\circ\text{C}$. Температурный режим регулировался элементом Пельтье. Для определения температуры ФЭМ использовалось платиновое термосопротивление (Pt100), подключенное по четырехпроводной схеме через измеритель на базе микросхемы MAX31865. Нагрузочные вольт-амперные характеристики регистрировались каждые $15\ \text{s}$ (синхронно с измерением значений температуры). Интенсивность постоянного лазерного излучения на длине волны $810\ \text{nm}$ контролировалась в начале и конце термоциклирования измерителем мощности оптического излучения. Измеренные значения совпадали с погрешностью измерителя мощности оптического излучения ($\pm 0.5\%$).

Фотоэлектрические параметры ФЭМ рассчитывались из экспериментальных световых вольт-амперных характеристик, полученных в процессе термоциклирования. На рис. 2, *a* представлены диаграмма изменения фототока ФЭМ в точке оптимальной нагрузки (кривая 1) и изменение температуры (кривая 2). На рис. 2, *b* при-

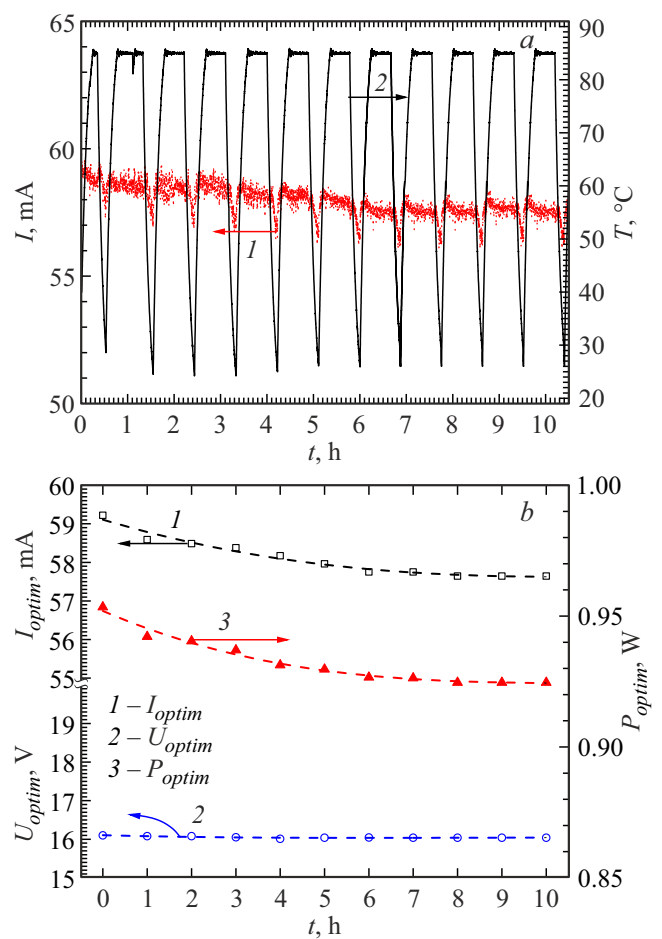


Рис. 2. *a* — изменение фототока СВЧ ФЭМ (рис. 1, *a*) на оптимальной нагрузке (1) и изменение температуры (2) при термоциклировании в диапазоне $25-85^\circ\text{C}$ и освещении непрерывным лазерным излучением с суммарной мощностью $2\ \text{W}$ на длине волны $\lambda = 810\ \text{nm}$; *b* — зависимости тока (1) и напряжения (2) на оптимальной нагрузке и электрической мощности (3) на выходе СВЧ ФЭМ от времени термоциклирования.

ведены результирующие зависимости тока (кривая 1), напряжения (кривая 2) и электрической мощности (кривая 3) на выходе СВЧ ФЭМ при термоциклировании. Видно, что после семичасового термоциклирования в диапазоне температур $25-85^\circ\text{C}$ фототок и напряжение в точке оптимальной нагрузки стабилизируются и устанавливаются соответственно на значениях $57.65\ \text{mA}$ и $16.02\ \text{V}$. Выходная электрическая мощность ФЭМ за $10\ \text{h}$ испытаний снизилась и стабилизировалась на значении $\sim 924\ \text{mW}$. На рис. 3 представлена зависимость относительного изменения КПД ФЭМ в процессе термоциклирования. Снижение КПД составило $\sim 3\%$.

В результате проведенных исследований фотоэлектрических параметров СВЧ ФЭМ при термоциклировании в диапазоне температур $25-85^\circ\text{C}$ и возбуждении постоянным лазерным излучением мощностью $2\ \text{W}$ на длине волны $810\ \text{nm}$ показано, что в течение $10\ \text{h}$ тер-

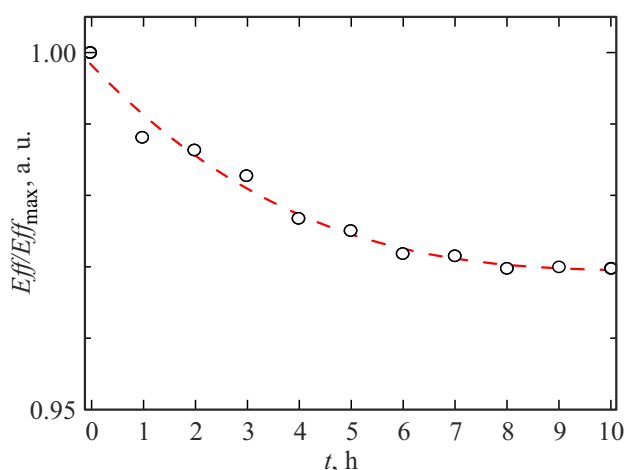


Рис. 3. Изменение КПД фотоэлектрического модуля в процессе термоциклирования в диапазоне температур 25–85°C при возбуждении постоянным лазерным излучением мощностью 2 W на длине волны 810 nm.

моциклирования наблюдается стабилизация выходных параметров модуля из 16 последовательно включенных сверхвысокочастотных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФЭП. Выходная электрическая мощность модуля снизилась с 953 до 924 mW, а уменьшение КПД при оптическом возбуждении постоянным лазерным излучением составило 3%, что демонстрирует хорошую температурную стабильность параметров СВЧ ФЭМ в фотовольтаическом режиме работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.Ф. Зайцев, *Нанопотоника и ее применение* (Актеон, М., 2012).
- [2] В.М. Андреев, Д.Ф. Зайцев, Н.Ю. Новиков, В.С. Калиновский, Д.В. Мордасов, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов, А.И. Фадеев, *Радиотехника*, № 11, 177 (2016).
- [3] V.J. Urick, in *Proc. of the Conf. on lasers and electro-optics*, OSA Technical Digest (Optica Publ. Group, 2018), paper SM1C.6. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2018.SM1C.6
- [4] S. Pan, Y. Zhang, *J. Lightwave Technol.*, **38** (19), 5450 (2020). DOI: 10.1109/JLT.2020.2993166
- [5] В.М. Андреев, Д.Ф. Зайцев, Н.Ю. Новиков, В.С. Калиновский, Д.В. Мордасов, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов, А.И. Фадеев, *Радиотехника*, № 8, 72 (2017).
- [6] Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолобов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, *Радиотехника*, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17
- [7] И.Д. Бурлаков, К.О. Болгарь, А.И. Патрашин, Е.В. Дегтярев, А.А. Солодков, *Прикладная физика*, № 4, 119 (2009).