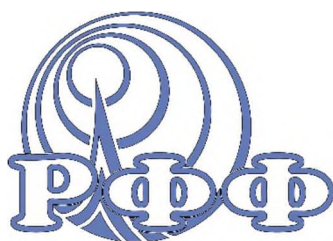




Национальный  
исследовательский

**Томский  
государственный  
университет**



Радиофизический факультет



10-я Международная научно-практическая конференция  
**Актуальные проблемы радиофизики  
АПР-2023**

**Сборник трудов конференции**

при поддержке:



26-29 сентября 2023 года  
г. Томск

УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;  
621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;  
535.33:621.373.8 А 43  
**А 43**

Под редакцией доктора технических наук А.В. Юрченко

**А 43** **Актуальные проблемы радиофизики:**  
X Международная научно-практическая конференция, г.  
Томск, 26-29 сентября 2023 г. Сборник трудов. – Томск:  
Издательский дом ТГУ, 2023. – 374 с.

В сборнике представлены доклады участников X Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы радиофизики 2023", проходившей в Томском государственном университете 26-29 сентября 2023 г. на базе радиофизического факультета. Доклады отобраны Программным комитетом конференции.

Сборник представляет интерес для специалистов в области радиофизики, радиоэлектроники, оптики, твердотельной электроники и электромагнитной совместимости.

**УДК 537.86; 621.38.01:53; 621.396.67; 621.372.8;**  
**621.3.029.6; 621.396.91/.96; 535.14;**  
**535.33:621.373.8**

## **S-диоды для накачки полупроводниковых лазерных диодов**

*Олейник Владимир Леонидович<sup>1</sup>*

*Прудаев Илья Анатольевич<sup>1</sup>, Копьев Виктор Васильевич<sup>1</sup>, Петрова Юлианна Сергеевна<sup>1</sup>,*

*Курасова Анна Сергеевна<sup>1,2</sup>, Гуцин Сергей Михайлович<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Томский государственный университет, Томск*

*<sup>2</sup>АО «НИИПП», Томск*

*E-mail: Vladimir.Oleinik@mail.tsu.ru*

### **Введение**

В последнее десятилетие интенсивно ведется разработка беспилотных систем управления, для них требуются радары, дальномеры и лидары. Лидар состоит из полупроводникового лазера, работающего в инфракрасном диапазоне длин волн, на который подается высоковольтный наносекундный импульс, при этом чем короче длительность оптического импульса, тем лучше разрешающая способность прибора. Для коммутации высоковольтных наносекундных импульсов в лидарах обычно используют силовые транзисторы изготовленные из GaN, однако у них есть два основных недостатка: большой размер и относительно высокая цена. В качестве альтернативы транзистору из GaN, предложено использование S-диодов на основе GaAs, который может выдавать высоковольтные электрические импульсы длительностью порядка 1 нс, а также на несколько порядков меньший размер по сравнению с транзисторами. Однако классическая методика производства S-диодов не позволяла получить большого выхода готовых приборов с одинаковыми характеристиками с одной пластины.

В работе описан новый техпроцесс для изготовления S-диодов на основе GaAs применяемых для накачки полупроводниковых лазерных диодов. Рассмотрено влияние состава и толщины легированных областей в изготовленных приборах на предельные токовые характеристики. Показано сравнение электрических характеристик S-диодов, произведенных по эпитаксиально-диффузионной технологии и с классической диффузионной.

### **Методики изготовления S-диодов**

1. Классическая диффузионная технология [1, 2] проводилась в несколько этапов. Исходные пластины представляли собой GaAs (100) полученные из слитка, выращенного методом вертикальной направленной кристаллизации, исходная концентрация электронов  $n = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . На одну, из стороны которых электронно-лучевым испарением наносили пленку Fe толщиной ~30 нм. В печи диффузионных отжигов УДО-3 в потоке осушенного Ag проводилась диффузия Fe в объем GaAs температура варьировалась от 800 до 1100 °C. Время проведения диффузионного отжига варьировалось от 1 до 11 часов. Для создания приконтактных слоев использовалась легирующая примесь Si ( $n^+$ -типа проводимости) [2]. Для этого после основной диффузии пластины помещались в кварцевые ампулы с навеской Si, а также добавлялась навеска мышьяка для предотвращения разложения GaAs во время проведения диффузии. Масса мышьяка рассчитывалась для создания парциального давления паров мышьяка в ампуле равном 1 атмосфере. Затем ампула вакуумировалась при помощи вакуумного поста фирмы Pfeiffer Vacuum и запаивалась газовой горелкой. Диффузионный отжиг проводился в промышленной диффузионной печи СДО-125/А. Время проведения диффузии варьировалось от 1 до 2 часов, при температурах 900–1100 °C. Для создания омических контактов напылялась пленка AuGe с обеих сторон структуры. Завершающим этапом была резка пластины на дискретные S-диоды.

Совершенствующийся техпроцесс изготовления S-диодов в течение нескольких десятилетий позволил получать большой выход рабочих диодов с пластины [2], но в них наблюдается большой разброс по электрическим характеристикам. Это предположительно связано либо с перераспределением легирующей примеси Fe при проведении диффузии для создания приконтактных слоев, либо с неоднородностью исходных пластин GaAs. Для решения этой проблемы предложено использовать многослойные структуры GaAs выращенные методом газовой эпитаксии.

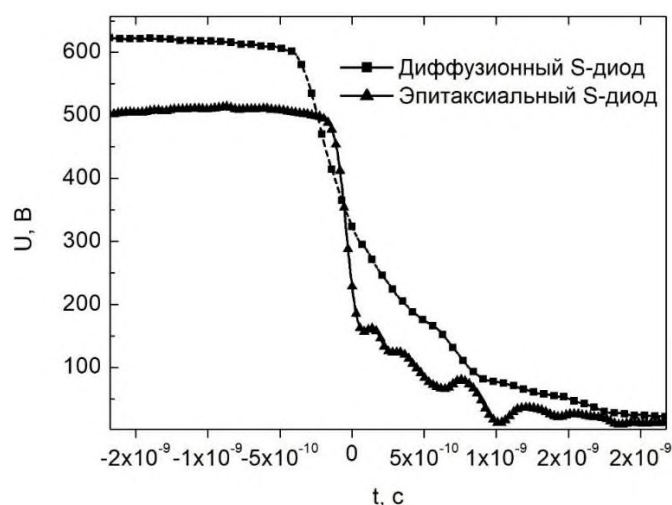
2. Эпитаксиально-диффузионная технология состояла из следующих этапов. Сначала проводился рост эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs хлорид-гидридным методом из газовой фазы на установке ЭТР-100. Рост проводился на подложках АГЧТ с направлением (100), в качестве легирующей примеси использовалась сера. Технологический процесс газовой эпитаксии выглядит следующим образом: исходными веществами являются жидкий легколетучий AsCl<sub>3</sub> и кристаллический GaAs (источник). В потоке H<sub>2</sub> (газ-носитель) пары AsCl<sub>3</sub> преобразуются в хлористый водород и свободный мышьяк. Эти вещества поступая в зону источника и взаимодействуя с ним образуют газовую смесь, состоящую из GaCl, As<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>, которая переносится в зону осаждения, где на исходную подложку осаждался GaAs. Главная особенность примененной технологии роста – получение высококачественных структур с заданным профилем легирования. Следующим этапом была диффузия Fe в потоке аргона, используемые режимы и оборудование аналогичны описанным для классической диффузионной технологии. Далее создавались омические контакты и проводилась резка на дискретные S-диоды. Предложено два типа эпитаксиальных структур: 1) многослойные эпитаксиальные структуры, выращенные за

один цикл с верхним  $n^+$ -слоем ( $n = 1.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Большая концентрация донорной примеси использовалась, чтобы при проведении диффузии Fe в приконтактном слое не поменялся тип проводимости в результате компенсации примесями разного типа проводимости; 2) эпитаксиальные структуры выращенные без  $n^+$ -слоя, который выращивался после проведения диффузии Fe.

#### Экспериментальное исследование S-диодов

S-диод – полупроводниковый прибор на обратной ветви вольт-амперной характеристики наблюдается участок с отрицательной дифференциальной проводимостью. Наличие этого участка связано с развитием лавинных процессов под действием сильного электрического поля [3]. Измерение импульсных электрических характеристик осуществлялось при помощи осциллографа Tektronix TDS-3052B (полоса пропускания 500 МГц). Сигнал снимался с эквивалентной нагрузки лазерного диода. Соединение S-диода и эквивалентной нагрузки проводилось по кратчайшему пути для минимизации паразитных индуктивностей, которые влияют на форму электрического импульса в цепи диод – нагрузка [4].

На *рис.1* представлены зависимости напряжений от времени. Из рисунка видно, что у эпитаксиального диода спад напряжения по времени происходит быстрее, это означает что длительность импульса на нагрузке будет меньше по сравнению с диодами, выполненными по эпитаксиальной технологии.



*рис.1* Зависимость напряжения от времени для S-диодов изготовленных по разным технологиям

Сравнение толщины легированных слоев показало увеличение предельного напряжения на S-диоде с увеличением толщины слоя. Напряжения для разных партий варьировались от 100 до 550 В, при толщинах слоев от 15 до 40 мкм. Диоды произведенные по эпитаксиально-диффузионной технологии показали больший выход рабочих S-диодов с меньшим разбросом напряжений из одной пластины, по сравнению с классической технологией.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 23-29-00053, <https://rscf.ru/project/23-29-00053/>.

#### Список публикаций:

- [1] Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами / С. С. Хлудков, О. П. Толбанов, М. Д. Вилисова, И. А. Прудаев; под ред. О. П. Толбанова; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. – Томск : Издательский Дом ТГУ. – 2016. – С. 258.
- [2] Диффузия примесей и собственных точечных дефектов в арсениде галлия / С. С. Хлудков, И. А. Прудаев, О. П. Толбанов, И. В. Ивонин; науч. ред. И. В. Ивонин; Нац. исслед. Томский гос. ун-т. – Томск : Издательство ТГУ, – 2022. – С. 248.
- [3] Prudaev I.A.// IEEE Transactions on Electron Devices. 2018. V. 65. № 8. P. 3339.
- [4] Патент на полезную модель №204986. Российская Федерация, МПК H01L 29/86 (2006.01). Устройство импульсного электрического питания полупроводникового лазера // Прудаев И.А., Скакунов М.С., Копьев В.В., Олейник В.Л. – Заявка № 2021108112 от 26.03.2021. – Опубликовано 22.06.2021