

УДК 621.382.2

## **Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды**

Малаховский О. Ю., Фотина Л. В.

*Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов  
ул. Красноармейская, 99а, Томск, 634034, Россия  
toy@niirp.ru*

Получено 1 ноября 2019 г.

Отрецензировано 16 декабря 2019 г.

Принято к публикации 20 декабря 2019 г.

**Аннотация:** *Представлены результаты исследования зависимости параметров быстродействующих импульсных кремниевых диодов, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния n-типа с различной концентрацией примеси, от диффузии примеси золота.*

**Ключевые слова:** *обратное восстановление, p-n переход, p-область, n-область, диффузия, диффузия золота, эпитаксиальная структура, быстровосстанавливающийся диод, время обратного восстановления.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Малаховский О. Ю., Фотина Л. В. Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 3. С. 411—415.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Малаховский, О. Ю. Быстровосстанавливающиеся кремниевые диоды / О. Ю. Малаховский, Л. В. Фотина // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 3. — С. 411—415.

# High-speed switching diodes

O. Yu. Malakhovskiy and L.V. Fotina  
*Scientific & Research Institute of Semiconductor Devices*  
99a, Krasnoarmeiskaya Str., Tomsk, 634034, Russia  
moy@niipp.ru

Received: November 1, 2019  
Peer-reviewed: December 16, 2019  
Accepted: December 20, 2019

**Abstract:** *The results of studies of the effect gold-to-silicon diffusion for the electrical parameters of silicon high-speed switching diodes are presented.*

**Keywords:** *high-speed diodes, p-n junction, reverse recovery time.*

**For citation (IEEE):** O. Yu. Malakhovskiy et al. "High-speed switching diodes," *Info-communications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 3, pp. 411–415, 2019.

## 1. Введение

Время обратного восстановления диода — это переходный процесс, возникающий при переключении диода с  $p$ - $n$  переходом из проводящего состояния (прямого) в закрытое (обратное). Процесс обратного восстановления возникает вследствие накопления неосновных носителей в обеих областях диода — катоде и аноде при прямом протекании тока через диод. После смены полярности напряжения на обратное, накопленные неосновные носители, которые не успели рекомбинировать, возвращаются в области, где они являются основными, но неравновесными (электроны в  $p$ -область, дырки в  $n$ -область), создавая короткий импульс (выброс) обратного тока. Время действия этого импульса тока (время обратного восстановления) тем меньше, чем меньше величина накопленного заряда неосновных носителей заряда при прямом смещении и меньше время установления равновесного состояния. Известно [1, 2], что для уменьшения времени обратного восстановления используется процедура легирования золотом области  $p$ - $n$  перехода. Примесь золота существенно уменьшает времена рекомбинации и установления равновесного состояния при переключении смещения на диоде из прямого направления в обратное.

Процессы, происходящие в кремнии при легировании золотом, рассмотрены достаточно подробно [1], однако результаты влияния легирования золотом на параметры диодов (за исключением времени обратного

восстановления) в литературе практически не встречаются. В данной работе авторы попытались ликвидировать этот пробел и рассмотреть влияние примеси золота на такие параметры диодов с *p-n*-переходом как обратное напряжение, обратный ток, емкость, прямое напряжение.

## 2. Технология изготовления экспериментальных образцов

Для исследования зависимости параметров быстродействующих импульсных кремниевых диодов от концентрации носителей заряда в *n*-слое нами выбраны кремниевые эпитаксиальные структуры с удельным сопротивлением рабочего эпитаксиального слоя *n*-типа от 0,9 до 60 Ом·см, изготовленные АО «ЭПИЭЛ» (г. Зеленоград).

Структурная схема кристалла представлена на рис. 1. Кристаллы изготовлены по планарно-эпитаксиальной технологии. В целом технология изготовления экспериментальных образцов близка к известной технологии [2]. Существенное отличие заключается в том, что пленка золота для дальнейшей диффузии в данной работе наносилась не на всю поверхность, а формировалась локально с помощью гравировки золота диаметром значительно меньшим (40—80 мкм), чем диаметр анода (220—360 мкм). Первоначально пленка золота толщиной 0,1—0,2 мкм наносилась термическим напылением на поверхность рабочей пластины, на которой локально сформирован диффузионный *p-n* переход, а затем гравировалась по маске фоторезиста. Легирование кремниевой эпитаксиальной структуры золотом осуществлялось при температуре 1150<sup>0</sup>С в течение 10—20 мин. Режимы диффузии золота для всех концентраций были одинаковыми.

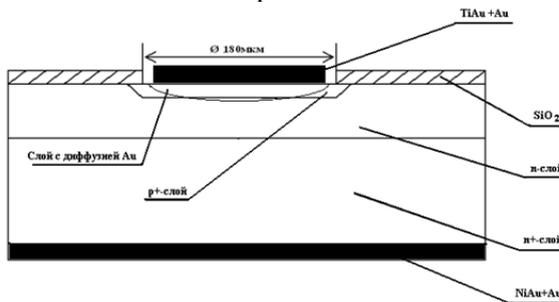


Рис. 1. Структурная схема кристалла.

Fig. 1. Block diagram of the crystal.

Металлизация анодного контакта проводилась послойным термическим напылением композиции TiAu толщиной 0,25+0,25 мкм с последующим осаждением золота толщиной 1,7 мкм. Термическое напыление слоев

титана (*Ti*) и золота (*Au*) проводилось в одном процессе на всю поверхность кремниевой пластины при температуре  $200^{\circ}\text{C}$ . Металлизация катодного контакта формировалась электрохимическим осаждением никеля (*Ni*) толщиной 0,08—0,1 мкм на шлифованную поверхность подложки с последующим осаждением золота толщиной 1,5 мкм.

### 3. Основные результаты

Установлено, что влияние процесса легирования золотом рабочей области эпитаксиальной структуры кремния на электрофизические параметры (емкость и обратное напряжение) диодов зависит от концентрации носителей заряда в эпитаксиальных *n*-слоях кремния, на которых изготовлены эти диоды.

Сравнительный анализ характеристик изготовленных диодов показал, что диффузия золота, как и ожидалось, значительно уменьшает время обратного восстановления на диодах, изготовленных на каждой из выбранных эпитаксиальных структур. Однако емкость диодов после диффузии золота может изменяться как в большую, так и меньшую сторону. После диффузии золота емкость уменьшалась на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах с высокой концентрацией носителей заряда (8КЭФ0,9) и увеличивалась на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния со средней и низкой концентрацией носителей заряда (9КЭФ9 и 15КЭФ60). Влияние диффузии золота на обратное напряжение диодов также зависит от удельного сопротивления (концентрации носителей заряда) эпитаксиальной пленки. Значительное увеличение обратного напряжения наблюдается на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах с высокой концентрацией носителей заряда (8КЭФ0,9) и крайне малое изменение значений обратного напряжения — на диодах, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния со средней и низкой концентрацией носителей заряда (9КЭФ9 и 15КЭФ60). Численные значения основных параметров этих диодов, изготовленных на эпитаксиальных структурах кремния без диффузии золота и после диффузии золота представлены в таблице 1.

### 4. Заключение

На основании проведенных исследований можно заключить, что на эпитаксиальных структурах кремния с высокой концентрацией носителей заряда в рабочем *n*-слое диффузия золота приводит к уменьшению значения емкости и значительному увеличению обратного напряжения. На эпитакси-

альных структурах кремния с низкой концентрацией носителей заряда в *n*-слое диффузия золота, наоборот, приводит к увеличению значений емкости и незначительному изменению (увеличению) обратного напряжения.

Таблица 1

Table 1

Тип эпитаксиального материала	Наименование параметра	Параметры без диффузии золота	Параметры после диффузии золота
8КЭФ0,9	Обратное напряжение при 1мкА, В	55	90
	Емкость при нулевом смещении, пФ	8,2	0,8
	Время обратного восстановления, нс	8,5	2,1
9КЭФ9	Обратное напряжение при 1мкА	70	100
	Емкость при нулевом смещении, пФ	3,02	6,6
	Время обратного восстановления, нс	6,5	1,96
15КЭФ60	Обратное напряжение при 1мкА	98	100
	Емкость при нулевом смещении, пФ	1,29	7,98
	Время обратного восстановления, нс	5,1	1,85

### Список литературы

1. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зуев А. В., Зуев В. В. Особенности проявления акцепторного состояния золота в кремнии с термодонорами // ФТП. 2008. Т. 42, вып.3. С. 271—275.
2. Верховодов В. И., Носов Ю. Р., Склярук А. М., Тарасевич А. И., Тарасиков М. В. Кремниевый быстродействующий микродиод // Электронная техника. 1990. Вып. 4 (207). С. 91—95.

### Информация об авторах

**Малаховский Олег Юрьевич**, к.ф.-м.н., начальник лаборатории Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов, г. Томск, Российская Федерация.

**Фотина Любовь Владимировна**, ведущий инженер-технолог Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов, г. Томск, Российская Федерация.

### Information about the authors

**Oleg Yu. Malakhovskiy**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of Department of Semiconductor Devices of Research Institute of Semiconductor Devices (Tomsk, Russian Federation).

**Liubov V. Fotina**, Lead technology engineer of Laboratory of Department of Semiconductor Devices of Research Institute of Semiconductor Devices (Tomsk, Russian Federation).