

# Фотопроводимость кремния, легированного серой, в спектральном диапазоне 10.6 мкм

© Х.Б. Сиябеков, В.Т. Туланов

Ташкентский государственный университет,  
700095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 18 декабря 1996 г. Принята к печати 25 февраля 1997 г.)

В импульсном режиме исследована примесная фотопроводимость Si(S) в условиях коротковолновой подсветки 10.6 мкм. Определено, что путем коротковолновой подсветки можно достичь увеличения чувствительности на 2–3 порядка. Установлено, что увеличение степени компенсации примесных уровней серы акцепторами, созданными при  $\gamma$ -облучении, приводит к уменьшению как темновой проводимости, так и фотоответа, обусловленного импульсным освещением CO<sub>2</sub>-лазера.

Фотопроводимость кремния, легированного серой, в области 10.6 мкм изучена крайне мало. Нам известна одна работа [1], где фотопроводимость Si(S) в спектральной области 10.6 мкм исследована при температуре 5 К.

Цель данной работы — исследование 10.6 мкм фотопроводимости Si(S) при температуре жидкого азота в условиях комбинированного светового возбуждения.

## 1. Технология изготовления образцов

При изготовлении образцов в качестве исходного материала были использованы пластины монокристалла кремния *p*-типа, легированного бором, с удельным сопротивлением  $\rho = 1600 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , толщиной 1.5 мм и диаметром 30 мм.

Диффузия серы проводилась при температуре 1250°C в течение 20 ч с последующим охлаждением на воздухе со скоростью 20 град/с.

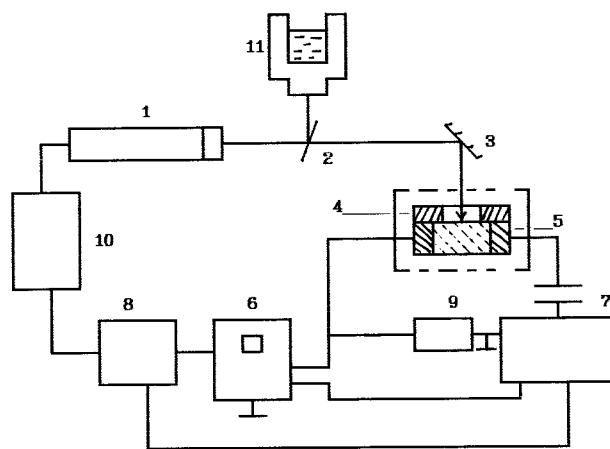
При измерении ЭДС методом подвижного светового зонда обнаружили, что после диффузии на поверхности образца образовался инверсный слой с противоположным типом проводимости по отношению к объему кристалла. Этот слой, обедненный основными носителями, составлял порядка 100 мкм.

Затем с обеих сторон пластины сошлифовались поверхностные инверсные слои и, с целью нанесения омического контакта, проведена диффузия фосфора при температуре 1200°C. После диффузии фосфора одна из сторон пластины сошлифовалась на толщину, превышающую глубину диффузионного проникновения примеси P. Из этой серии пластины изготавливались фоторезисторы. Для этого из пластины вырезали образцы в виде параллелепипеда размерами  $10 \times 5 \times 1.5 \text{ мм}^3$ . Омические контакты в отличие от фотоприемников изготавливались электролитическим высаживанием никеля. Расстояния между никелевыми контактами составляли 5 мм. Изготовление фоторезисторов завершалось припайванием никелевых электродов (проволочек).

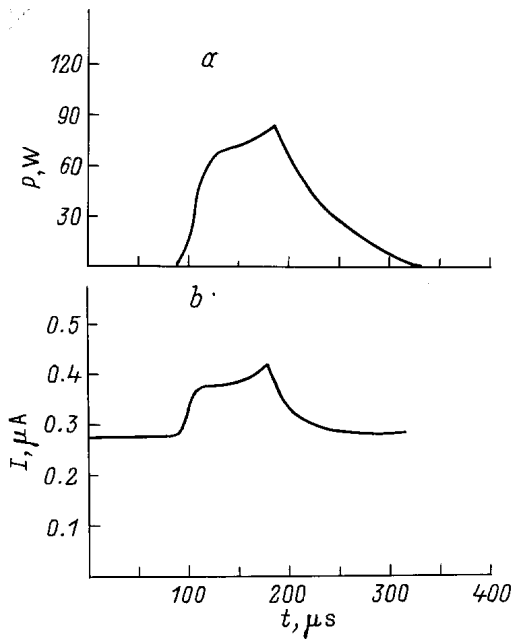
## 2. Методика эксперимента и полученные результаты

Для исследования фотопроводимости кремния, легированного серой, в импульсном режиме была собрана установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Свет от CO<sub>2</sub>-лазера (1) с помощью плоского зеркала (3) проецируется через отверстие (4) с диаметром 3 мм на открытую поверхность образца (5). Часть излучения с помощью полупрозрачного кремниевое зеркала (2) ответвляется на комбинированный германий фотоприемник (11) для контроля за формой и мощностью импульса излучения. Измерение кинетики тока и контроль импульса излучения проводился с помощью двухлучевого осциллографа (6). На измерительную схему подается импульс напряжения от генератора (7). Синхронный запуск лазера, осциллографа и генератора питания осуществляется генератором (8). Измеряемые



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования фотопроводимости в импульсном режиме. 1 — CO<sub>2</sub> лазер ЛГ-50, 2 — полупрозрачная кремниевая пластина, 3 — зеркало, 4 — отверстие, 5 — образец, 6 — осциллограф, 7 — генератор управления, 8 — генератор (линия задержки), 9 — сопротивление нагрузки, 10 — источник питания, 11 — германиевый фотоприемник.



**Рис. 2.** Осциллограмма импульсов мощности  $\text{CO}_2$ -лазера (а) и фотоотклика фотоприемника при импульсном освещении  $\text{CO}_2$ -лазером.

сигналы в виде темнового тока и фототока снимаются с нагрузочного сопротивления (9).

Для исследования фотопроводимости в качестве источника излучения служил импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер ЛГИ-50 с продольным разрядом, создающий малый уровень наводок.

Для получения количественных характеристик необходимо знать временное распределение интенсивности в излучении лазера. С этой целью выполнены два измерения. Определялись энергия излучения в импульсе с помощью прибора ИМО-2М (13 мДж, диаметр пучка 9 мм) и относительное временное распределение излучения с помощью германиевого охлаждаемого фотоприемника. По этим двум данным легко определить искомую зависимость. Результаты измерения приведены на рис. 2, а.

Нестабильность интенсивности излучения лазера была не более 2.5%. Измерение проводилось в специальном криостате, обеспечивающем температуру фотоприемника до 75 К.

Типичная осциллограмма фотоотклика приведена на рис. 2, б. Фотоответ практически полностью повторяет форму импульса  $\text{CO}_2$ -лазера. Фотоотклик отчетливо наблюдается на фоне темнового тока при интенсивности возбуждения порядка 100 Вт с кратностью ( $\Delta I/I_d$ ) до 50%.

Специально проверялось омичность контактов путем снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) как в темноте, так и при освещении. При использовании окончательного варианта технологических режимов нанесения контактов во всех случаях наблюдалась линейная ВАХ и отсутствие выпрямления.

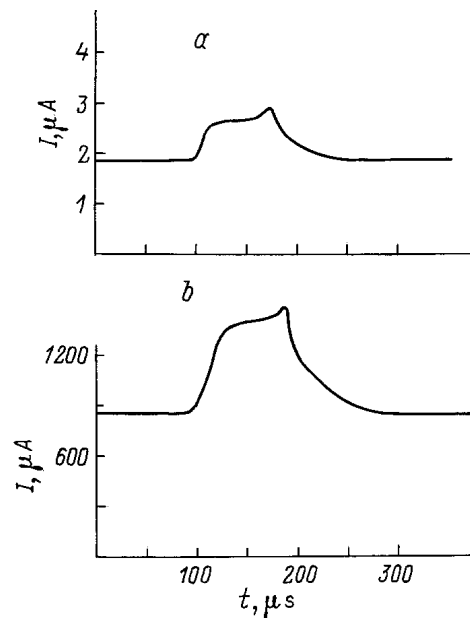
Специально проведенные эксперименты показали, что фотоотклик фотоприемника  $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$  линейно зависит от интенсивности  $\text{CO}_2$ -лазера по крайней мере до 120 Вт/см<sup>2</sup>. Дополнительные опыты, проведенные с использованием фокусировки излучения показали, что линейность фотоотклика сохраняется при увеличении интенсивности излучения более чем на порядок.

### 3. Примесная фотопроводимость $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ , обусловленная "коротковолновой" подсветкой

Примесная фотопроводимость  $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ , обусловленная коротковолновой подсветкой, была исследована на экспериментальной установке, описанной выше. Подсветка образцов осуществлялась лампой накаливания с регулируемой интенсивностью либо непосредственно, либо через германиевый или кремниевый фильтры. В качестве источника 10.6 мкм излучения служил  $\text{CO}_2$ -лазер с пиковой мощностью 160 Вт.

Проведенные эксперименты показывают, что зависимости темнового тока и фототока от интенсивности подсветки имеют линейный характер, так что кратность во всех исследованных диапазонах подсветки сохраняется.

На рис. 3 приведены осциллограммы фототоков в образце при освещении импульсом  $\text{CO}_2$ -лазера. Из рисунка видно, что при увеличении путем постоянной равновесной подсветки темнового тока до 600 мкА наблюдается увеличение фототока в 400 раз, т.е. значительно усиливается фоточувствительность в области 10.6 мкм.



**Рис. 3.** Осциллограмма фототока  $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$  при импульсном освещении  $\text{CO}_2$ -лазером: а — без подсветки, б — с подсветкой.

#### 4. Влияние степени компенсации примесных уровней серы в кремнии на 10.6 мкм фотопроводимость

Одним из широко распространенных способов компенсации примесных уровней кремния является облучения его  $\gamma$ -квантами. При  $\gamma$ -облучении в запрещенной зоне кремния создается ряд донорных и акцепторных уровней [2]. Поскольку сера в кремнии создает ряд донорных уровней в верхней половине запрещенной зоны [3], а при  $\gamma$ -облучении донорные уровни создаются в нижней половине, они никак не могут проявить себя в 10.6 мкм фотопроводимости. Повлиять могут только акцепторные уровни, уменьшая степень заполнения донорных уровней, созданных серой, и концентрацию свободных электронов в зоне проводимости.

Исследовались образцы с удельным сопротивлением 80 Ом · см, полученные путем диффузии серы в бестигельный кремний  $p$ -типа с начальным удельным сопротивлением 1600 Ом · см. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами  $10 \times 8 \times 1$  мм<sup>3</sup>. На одной грани с большей площадью, на расстоянии 7 мм друг от друга наносились электрохимически два никелевых контакта. Источником излучения, как и в предыдущем случае, служил импульсный CO<sub>2</sub>-лазер ЛГИ-50, дающий импульс длительностью 150 мкс, с энергией 13 мДж. К образцу прикладывалось постоянное напряжение 10 В. Величины темнового тока и фотоответа измерялись аналогичным образом. Источником  $\gamma$ -излучения служил <sup>60</sup>Co, создающий поток  $1.7 \cdot 10^{12}$  кв./см<sup>2</sup> · с.

В таблице приведены полученные значения темнового тока ( $I_d$ ), фототока ( $\Delta I$ ) и их кратности ( $\kappa$ ) от времени ( $\Delta t$ )  $\gamma$ -облучения для двух образцов.

№ образца	$I_d, A$	$\Delta I, A$	$\kappa = \Delta I / I_d$	$t, ч$
11	$6 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$	0
	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-1}$	3
	$10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	2.5	21
13	$10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-2}$	0
	$10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$	9

Видно, что при увеличении времени облучения, т.е. увеличения степени компенсации, темновой ток и фототок уменьшаются, в то время как кратность увеличивается на 2 порядка.

Аналогичное исследование проведено и в [4], где теоретическими расчетами показано, что в 10.6 мкм фотопроводимости Si(S) участвуют не менее двух энергетических уровней в запрещенной зоне кремния.

Таким образом, обнаружение 10.6 мкм фоточувствительности кремния, легированного серой, при температуре жидкого азота дает хорошие предпосылки для создания на его основе полупроводникового преобразователя изображений ионизационного типа [5] для регистрации оптической информации в диапазоне излучений CO<sub>2</sub>-лазера.

Авторы признательны В.Б. Шуман и Е.Г. Гук за любезно предоставленные образцы Si(S) и Г.Б. Горлину за помощь при техническом осуществлении экспериментов.

#### Список литературы

- [1] N. Sclar. *Infr. Phys.*, **167**, 435 (1976).
- [2] В.С. Вавилов, И.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники* (М., Наука, 1988).
- [3] А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Ш. Махкамов. *ФТП*, **8**, 262 (1974).
- [4] Г.Б. Горлин, В.Т. Туланов, Х.Б. Сиябеков. *ЖТФ*, **67**, в. 10, 142 (1997).
- [5] Ю.А. Астров, А.А. Лебедев, А.Т. Мамадалимов, Ш.С. Касымов, Л.Г. Парицкий. *Деп. в ВИНТИ*, № 2463-75 (1975).

Редактор В.В. Чалдышев

#### Photoconductivity of sulphur-doped silicon in a spectral range 10.6 $\mu$ m

Kh. Siabekov, V.T. Tulanov

Tashkent State University,  
700095 Tashkent, Uzbekistan