

# Полупроводниковый преобразователь инфракрасных изображений ионизационного типа на основе Si(S) с чувствительностью в спектральном диапазоне излучения CO<sub>2</sub>-лазера

© В.Т. Туланов, Х.Б. Сиябеков, А.Ш. Давлетова, К.А. Ортаева

Ташкентский государственный университет им. М. Улугбека,  
700095 Ташкент, Узбекистан

(Получена 15 ноября 2000 г. Принята к печати 19 декабря 2000 г.)

Исследован полупроводниковый преобразователь инфракрасных изображений ионизационного типа в импульсном режиме при температуре 77 К. Показано, что путем коротковолновой подсветки фотоприемника преобразователя инфракрасных изображений можно управлять спектральным диапазоном его фоточувствительности ( $\lambda = 5\text{--}10.6$  мкм). Быстродействие преобразователя составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  с.

Полупроводниковые фотографические системы [1–4] и преобразователи инфракрасных (ИК) изображений [5–7] ионизационного типа в последнее время развивались и совершенствовались в основном применительно к задачам пространственно-временной диагностики ИК лазерных излучений. На этом пути были достигнуты значительные успехи, выдвинувшие ионизационную систему в первые ряды приборов высокоскоростной ИК фотографии. Так, спектральный диапазон удалось расширить, сместив длинноволновую границу с 0.7 до 5 мкм, достигнута фотографическая чувствительность  $10^6$  см<sup>2</sup>/Дж, быстродействие  $10^{-7}$  с, пороговая регистрируемая мощность ИК излучения составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Одним из путей дальнейшего совершенствования фотографических систем и преобразователей ИК изображений ионизационного типа является расширение спектрального диапазона чувствительности и снижение пороговой мощности регистрируемого излучения.

Для достижения этой цели требуется специальный режим легирования материала фотопроводника, обеспечивающий фоточувствительность в более длинноволновой области спектра и высокий уровень фотоэлектрического усиления. Такие фотопроводники можно изготавливать на основе кремния, легированного серой [8–12]. В [12] обнаружена примесная фотопроводимость Si(S) в спектральном диапазоне излучения CO<sub>2</sub>-лазера (длина волны  $\lambda = 10.6$  мкм). За наблюдаемую примесную фотопроводимость может быть ответствен или энергетический уровень серы 0.08 эВ [8], или уровень 0.109 эВ [9], или два уровня, существующие одновременно 0.08 и 0.109 эВ [10,11].

С целью уточнения участия этих уровней в фотопроводимости вблизи  $\lambda \approx 10$  мкм авторами работы [13] был проведен ряд экспериментов, где исследовано влияние степени компенсации примесных донорных уровней акцепторами, созданными при  $\gamma$ -облучении, на фотопроводимость в спектральной области излучения CO<sub>2</sub>-лазера.

Эксперименты показали, что по мере увеличения степени компенсации увеличивается отношение световой и темновой проводимости (при CO<sub>2</sub>-лазерном освещении), что может обеспечить четкость (контрастность) изобра-

жений ИК фотографических систем с использованием этих фотоприемников. Там же теоретическими расчетами показано, что в спектральной области  $\lambda \approx 10.6$  мкм участвуют одновременно энергетические уровни серы в кремнии  $E_c - 0.08$  эВ и  $E_c - 0.109$  эВ.

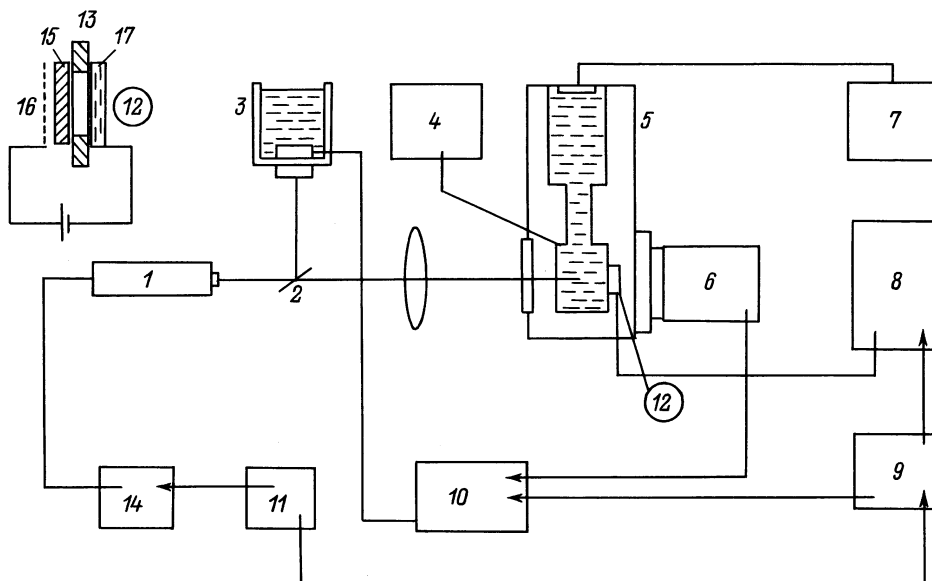
В настоящей работе приведены результаты исследования нового типа ионизационного преобразователя ИК изображений в импульсном режиме с использованием фотоприемника из Si(S).

## 1. Принцип работы инфракрасного преобразователя и методика эксперимента

Принцип работы преобразователя основан на управлении плотностью разрядного тока газонаполненного воздушного зазора, созданного диэлектрической прокладкой 18 при проектировании ИК изображения на поверхность фотопроводника 15 (см. рис. 1). Разрядный ток в системе устанавливается после приложения к электродам 16 и 17 высоковольтного импульсного напряжения. Образовавшиеся при пробое воздушного зазора положительные и отрицательные заряды в зависимости от полярности приложенного электрического напряжения будут вызывать свечение люминофора, нанесенного на внутреннюю поверхность электрода 17.

Кинетика свечения экрана с люминофором в зависимости от условия фотосъемки изучается путем фотографирования, визуального наблюдения или регистрации фотоэлектронным умножителем (ФЭУ). В отдельных случаях появившееся на экране изображение может многократно усиливаться электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) [14].

Для осуществления фотографической съемки в ИК области спектра, в частности в спектральной области излучения CO<sub>2</sub>-лазера, фотографическая ячейка 12 устанавливается в охлаждаемый криостат 5, выполненный в виде фотоаппарата со специальными окнами, снабженными ИК фильтрами.



**Рис. 1.** Принципиальная схема работы низкотемпературного импульсного ИК преобразователя изображения ионизационного типа. Пояснения в тексте.

Пульт управления данной системы является генератор *11*, который запускает блок питания *14* лазера *1* и одновременно через генератор *9* передает на осциллограф *10* развертывающий сигнал.

К моменту приложения к системе высоковольтного импульсного напряжения от источника *8*, который запускается генератором *9* через линию задержки, лазерный луч, пройдя ИК линзу *13*, создает на фотоприемнике рельеф локального изменения проводимости. Рельеф, управляя плотностью тока через систему, превращается в видимое изображение на экране. В процессе съемки и при снятии характеристик фотографического процесса временная стабильность интенсивности лазерного луча, разделяемого зеркалом *2*, периодически контролируется охлаждаемым германиевым фотодиодом *3*.

Температура системы измеряется термопарой медь-константан с помощью измерительного прибора *4*. С целью поддержания предельно возможной низкой температуры в процессе регистрации лазерного луча  $\lambda = 10.6$  мкм постоянно работает теплоотвод *7*.

В процессе установления оптимального режима фотосъемки весь цикл электрических измерений проводился запоминающим осциллографом *10* через ФЭУ *6* и фотодиод *3*.

Для снятия *D–H*-характеристик (зависимость почернения фотослоя от плотности лучистой энергии) фотосистемы использовался фотоснимок свечения разряда, получаемый на аэрофотопленке-42 с помощью фотоаппарата "Зенит" с объективом "Гелиос" и дополнительными кольцами. Характеристика снималась путем фотографирования на одном кадре различного количества импульсов (суммарная энергия излучений в каждой точке определялась числом импульсов лазера).

Для определения резольвометрических свойств фотоприемных элементов использовался метод анализа распределения оптической плотности почернения на границе абсолютного контраста. Указанное распределение снималось на микроденситометре ИФО-451 с шириной щели, обеспечивающей линейное разрешение 20 мм.

## 2. Преобразователь с управляемым спектральным диапазоном фоточувствительности

Как известно, спектральный диапазон чувствительности полупроводникового преобразователя ИК изображений определяется фотоприемником.

Обычные фотоприемные элементы имеют строго фиксированный спектральный диапазон чувствительности, определяемый положением локальных энергетических состояний в запрещенной зоне. Поэтому для обеспечения фоточувствительности в средневолновом и длинноволновом спектральном интервале приходится использовать разные фотоприемники с разным положением уровней и соответственно с различной темновой проводимостью при данной рабочей температуре.

В рамках настоящей работы была установлена возможность использования фотоприемника из кремния, легированного серой, как для спектрального диапазона  $\lambda = 1–4$  мкм, так и для диапазона до  $\lambda = 5–10$  мкм. Такая возможность теоретически доказана в [15] и экспериментально реализована в работах [12,13], она основывается на явлении индуцированной примесной фотопроводимости в полупроводниках [16].

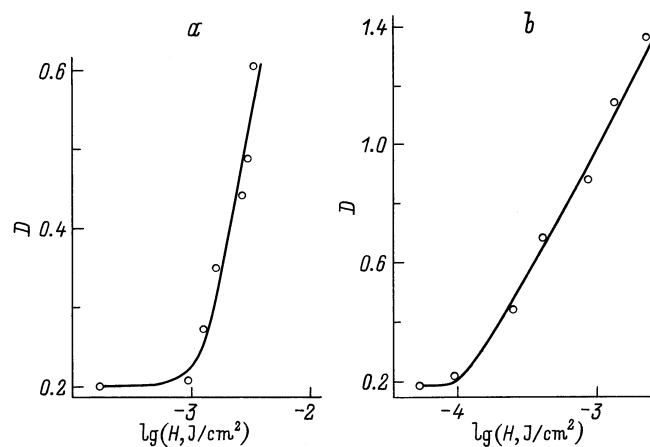
При определенной схеме легирования реализуется ситуация, когда локальные уровни, ответственные за чувствительность в средневолновой области спектра (1–4 мкм) заполнены, а уровни, ответственные за длинноволновую чувствительность (5–10 мкм), свободны от носителей тока. При этом чувствительность фотоприемного элемента простирается до 4 мкм. При равномерном освещении дополнительным постоянным источником белого света всей приемной поверхности фотоприемного элемента происходит заполнение мелких уровней и появление чувствительности в области до 10 мкм при одновременном возрастании темновой проводимости. Таким образом, переключение чувствительности с области  $\lambda \leq 4$  мкм на область  $\lambda \leq 10$  мкм производится просто равномерным постоянным освещением от дополнительного источника света.

### 3. Исследование быстродействия преобразователя

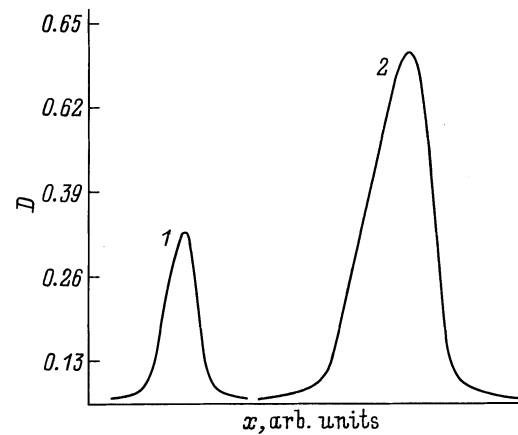
Для осуществления скоростной фотографии требуются низкоомные быстродействующие фотоприемники. Такие фотоприемники, как уже отмечалось выше, изготавливаются на основе кремния, легированного серой [12].

Расчет, проведенный на основе анализа переходных процессов в полупроводниковой фотографической системе ионизационного типа, показывает, что для достижения быстродействия на уровне  $10^{-7}$  с удельное сопротивление полупроводника при температуре жидкого азота должно быть не выше  $7 \cdot 10^4$  Ом·см, что соответствует расположению уровня Ферми на 0.125 эВ от дна зоны проводимости. В условиях нашего эксперимента это соответствует току 0.1 А при напряжении 600 В на фотоприемнике толщиной 1 мм.

Если считать, что энергия наиболее мелкого уровня серы равна 0.1 эВ, то степень заполнения его при температуре 77 К должна составлять 2%.



**Рис. 2.**  $D-H$ -характеристика изображений лазерного пучка, снятая с подсветкой фотоприемника в обычных условиях (а) и в условиях электронно-оптического усиления (б).



**Рис. 3.** Денситограмма снимка  $CO_2$ -лазерного излучения по координате  $x$  без подсветки (1) и с подсветкой (2) через германиевый фильтр.

Эксперименты были проведены с регистрацией излучения  $CO_2$ -лазера типа ЛГИ-50, работающего в режиме импульсов длительностью 150 мкс с энергией 13 мДж. Снятые осциллограммы тока показали, что разработанные фотоприемники позволяют реализовать время переходных процессов в системе на уровне  $(3-5) \cdot 10^{-8}$  с. Ампер-ваттная чувствительность в спектральном диапазоне вблизи 10.6 мкм равна  $2.3 \cdot 10^{-4}$  А/Вт.

Фотографические характеристики системы исследовались при импульсном питании в интервале времен  $10^{-5}-10^{-6}$  с. При этом чувствительность была не хуже  $10^{-4}$  Дж/см<sup>2</sup>. Разрешающая способность составляла  $7 \text{ мм}^{-1}$ .

С экрана преобразователя были сняты фотографии при различных экспозициях лазерного излучения  $\lambda = 10.6$  мкм. На рис. 2 приведены денситограммы изображения ( $D-H$ -характеристики) лазерного пучка, снятые с подсветкой в обычных условиях (а) и в условиях электронно-оптического усиления (б).

На рис. 3 показаны денситограммы излучения  $CO_2$ -лазера по координате  $x$  без подсветки (1) и с подсветкой (2) через германиевый фильтр.

Таким образом, на основе данного преобразователя ИК изображения ионизационного типа можно произвести скоростную покадровую съемку пространственно-временного распределения интенсивности  $CO_2$ -лазерного излучения.

Следует отметить, что приведенные сенситометрические характеристики фотографического устройства не являются предельными. Совершенствуя специально разработанную технологию получения образцов Si(S) с последующим управлением их темновой проводимостью в сочетании с электронно-оптическим усилением изображений с экрана преобразователя, можно достичь еще более высоких показателей.

## Список литературы

- [1] Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин. ФТП, **4** (4), 764 (1970).
- [2] Ю.А. Астров, Г.Б. Горлин, Л.Г. Парицкий, Л.М. Порцель, С.М. Рывкин, В.Т. Туланов. Деп. ВИНТИ, № 31186-77.
- [3] Ю.А. Астров, В.В. Егоров, Ш.С. Касымов, В.М. Муругов, Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин. Квант. электрон., **4**, 1681 (1977).
- [4] V.T. Toulanov, S.Z. Zaynabidinov. Turk. J. Phys., **21**, 1817 (1997).
- [5] Ш.С. Касымов, Л.Г. Парицкий, С.М. Рывкин. ФТП, **9** (4), 820 (1975).
- [6] В.Т. Туланов, А.Т. Тешабаев. В сб.: *Исследование по физике твердого тела* (Ташкент, ТашГУ, 1981) с. 38.
- [7] В.Т. Туланов. Автореф. канд. дис. (ФТИ им. С.В. Стародубцева, Ташкент, 1998).
- [8] S.D. Brotherton, M.J. King, G.J. Parker. J. Appl. Phys., **52** (7), 4649 (1981).
- [9] D.L. Comphausen, H.M. Jams, R.J. Sladek. Phys. Rev., **132** (6), 1899 (1970).
- [10] B. Pojot, G. Grossmann, M. Astier, C. Nand. Sol. St. Commun., **54** (1), 57 (1985).
- [11] B. Pojot, C. Nand. J. Phys., **45**, 539 (1984).
- [12] Х.Б. Сиябеков, В.Т. Туланов. ФТП, **31**, 1425 (1997).
- [13] Г.Б. Горлин, В.Т. Туланов, Х.Б. Сиябеков. ЖТФ, **67** (10), 142 (1997).
- [14] Т.В. Бурова, А.Н. Лодыгин, Л.Г. Парицкий, В.М. Тучкевич, И.Д. Ярошецкий. Письма ЖТФ, **11**, 215 (1985).
- [15] В.Т. Туланов, Х.Б. Сиябеков. ФТП, **27**, 1751 (1993).
- [16] С.М. Рывкин. *Фотоэлектрические явления в полупроводниках* (М., Физматгиз, 1963).

Редактор Л.В. Шаронова

### **An ionization type semiconductor transformer of infrared imagies on the base of Si⟨S⟩ for the spectral range of the CO<sub>2</sub>-laser emission**

V.T. Toulanov, Kh.B. Siyabekov, A.Sh. Davletova,  
K.A. Ortaeva

M. Ulugbek Tashkent State University,  
700095 Tashkent, Uzbekistan