

ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

Найдем усиление напряженности электрического поля в области дефекта изоляционного материала с учетом (1) и (2)

$$K_E = \frac{E_2}{E_1} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)\epsilon_2}{2\epsilon_1\epsilon_2} \cong \frac{\epsilon_2(1 + \epsilon_2)}{2}. \quad (3)$$

Как следует из (3), при изменении ϵ_2 от 2 до 10 $K_E \cong 3-50$. Следовательно, появление локальных участков повышенной напряженности E_x свидетельствует о нарушении целостности структуры контролируемых изоляционных материалов, причем области локальных полей являются местами структурных дефектов этих материалов.

При контроле устройством диагностики качества структуры изоляционных изделий выносной элемент – твердотельный ПЭП, либо на дискретной МДП-структуре перемещается по поверхности находящегося под положительным потенциалом металлического стержня. Электрическое поле, создаваемое потенциалом стержня, периодически с частотой 1 кГц воздействует на стадии экспонирования на измерительный электрод ИЭ2 в режиме контроля качества структуры изоляционных материалов. На выходе ПЭП по обоим каналам формируется переменное напряжение $U_{вых} = K \cdot E_x$, частотой 1 кГц, где E_x – локальная напряженность электрического поля контролируемого объекта. Напряжение сигнала фильтруется от сетевых и высокочастотных помех сглаженным фильтром, настроенным на рабочую частоту электронного коммутатора. Напряжение сигнала оптимального значения по амплитуде (0,5–1,5 В) формируется в блоке многорежимных усилителей.

УДК 681.316

МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Синтезирован матричный преобразователь тепловых полей, реализованных матрицей фотодиодов, сформированных на полупроводниковом основании. Приведены конструктивные параметры преобразователя, механизм его работы и электрофизические параметры.

Ключевые слова: преобразователь тепловых полей, фотодиод, p-n-переход, омический контакт, матрица фотодиодов.

MATRIX CONVERTER OF THERMAL FIELDS

Sychyk V., Ulasiuk M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. A matrix converter of thermal fields is synthesized, implemented by an array of photodiodes formed on a semiconductor base. The design parameters of the converter, the mechanism of its operation and electro-physical parameters are given.

Key words: thermal field converter, photodiode, p-n junction, ohmic contact, photodiode array.

Адрес для переписки: Сычик В.А., пр-т Рокоссовского, 49-18, г. Минск 220095, Республика Беларусь

Типы и точность выявления дефектов в изоляционных материалах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вид дефекта	Порог чувствительности дефектов, В/мм	Точность выявления места дефекта, мм
Сплошные трещины, раковины	0,1–0,4	±0,5
Тип контролируемого объекта	Способ выделения информации	Расстояние ПЭП от контролируемой поверхности, мм
Изоляционный материал	Амплитудно-частотный	0,1

На базе рассмотренного метода можно синтезировать ряд высокоэффективных устройств для качественного контроля целостности структуры изоляционных материалов и изделий.

Выводы.

1. Дефектные участки изоляционных материалов, контактирующих с находящимися под постоянным напряжением металлами, генерируют градиенты напряженности электрического поля.

2. Точный контроль качества структуры диэлектрических материалов и изделий обеспечивает метод, базирующийся на оценке интенсивности электрических полей от находящихся под электрическим потенциалом контролируемых областей.

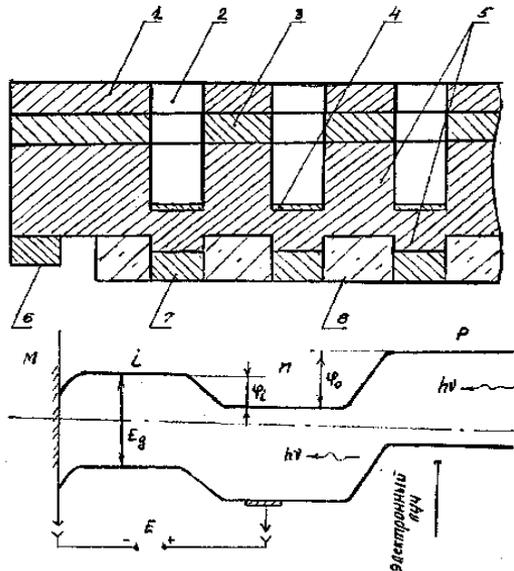
Литература

- Сычик, В. А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур / В. А. Сычик. – Мн. : Выш. Школа, 1991. – 179 с.
- Способ измерения напряженности электрического поля : пат. RU Д010249 / В. А. Сычик, В. А. Воробьев, А. В. Бреднев.

Для неразрушающего контроля дефектов структуры электрических агрегатов, базирующегося на оценке интенсивности тепловых полей от нагретых поверхностей агрегатов, необходимо использование в устройствах контроля специальных преобразователей тепловых полей. Для этой цели можно использовать терморезисторы [1], которые, однако, имеют низкую чувствительность, разрешающую способность и высокую инерционность. Более эффективны полупроводниковые фотодиоды [2], обладающие высоким быстродействием, однако они также имеют недостаточную чувствительность и точность оценки интенсивности тепловых излучений.

В качестве первичного преобразователя тепловых полей нами разработан термоохлаждаемый инфрокрасный преобразователь, который обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Структурно термоохлаждаемый преобразователь тепловых полей содержит, как показано на рис. 1, матрицу диодов обратной проводимости, состоящих из верхних и нижних слоев 1, 2. Слой примесного полупроводника, защищенный окисной пленкой, является одновременно и нижним слоем монокристаллического полупроводникового основания, верхний слой которого, представляет собой структуру собственного полупроводника, на который нанесена металлическая пленка.



- 1 – металлический слой; 2 – оптический канал;
- 3 – слой собственного полупроводника;
- 4 – просветляющий слой; 5 – полупроводниковое основание; 6 – омический контакт;
- 7 – слой обратной проводимости;
- 8 – изоляционный слой

Рисунок 1 – Структура преобразователя фоновых излучений (а) и зонная диаграмма его полупроводниковой структуры (б)

Нижний слой фотодиода обратной проводимости формируется путем легирования верхних слоев фотодиода акцепторной примесью. В полупроводниковом основании выполнены оптические каналы к фотодиодам. Нижние слои фотодиода и частично его верхние слои отделены друг от друга диэлектрическими окисными областями. На слое примесного полупроводника сформирован омический контакт.

Полупроводниковое основание в устройстве является конструкционной основой и служит в комплексе со слоем металла термоохлаждающим. Как показали результаты эксперимента, оптимальным для реализации этих функций материалом полупроводникового основания является монокристаллический кремний, который в контакте со слоем металла обеспечивает эффективное охлаждение основания. Так как ток протекающий, через основание, осуществляет инжекцию электронов из металлического слоя в слой 4, его толщина выбирается из условия полного поглощения инжектированными электронами энергии кристаллической решетки собственного полупроводника в течение времени их жизни, а следовательно должна быть не меньше длины свободного пробега электронов и не больше удвоенной ее длины. Кроме того, собственный полупроводниковый слой выбирается широкозонным (для кремния $E_g = 1,11$ эВ), монокристаллическим и высокоомным с целью получения высокого потенциального барьера между слоем металла и слоем 4 и минимальной концентрации электронов в этом слое. Эти факторы и обуславливают максимально возможное снижение температуры синтезированного устройства, что обеспечивает существенное повышение чувствительности и точности показаний.

Нижний слой полупроводникового основания, который является одновременно и верхним слоем фотодиода, получается легированием кремния донорной примесью. Кремний, легированный примесью, создающей глубокие примесные уровни ($E_n \geq 0,1$ эВ), является также высокочувствительным материалом в широкой полосе излучений нагретых поверхностей от инфракрасного ($\lambda \sim 6$ мкм, $T \sim 20$ °С) до ультрафиолетового ($\lambda = 0,5$ мкм, $T \geq 2500$ °С). Это то позволяет решить одновременно несколько задач: создать омический контакт к основанию; обеспечить эффективную инжекцию электронов из металлического слоя в слой 4, что возможно при эффективной рекомбинации электронов за его пределами, и при выполнении условия, что работа выхода собственного полупроводника выше работы выхода металла; получить в слое I глубокие примесные уровни, но не ниже 0,1 эВ, которые обуславливают высокий квантовый выход носителей заряда, что позволяет использо-

вать примесный слой в качестве чувствительных к фононным и фотонным потоком верхних областей фотодиодов матрицы.

Толщина этого слоя определяется максимально возможным числом генерируемых излучением носителей тока и их разделением на р-п-перехода фотодиода, обуславливающим высокую чувствительность и точность показаний. Это достигается в случае, когда толщина примесного слоя фотодиода не превышает длину свободного пробега носителей в данном полупроводнике (L). Минимальное значение ее должно быть не ниже $1/2L$ из-за существенного снижения числа генерируемых носителей. Однако число генерируемых в слое фотодиода носителей тока зависит от скорости поверхностной рекомбинации этих носителей. Последняя существенно зависит от состояния поверхности матрицы, что обуславливает значительное снижение чувствительности и точности. Устранение этого недостатка было достигнуто окислением верхней части полупроводниковых слоев фотодиодов.

Оптимальная толщина окисной пленки, удовлетворяющая данным требованиям, находится в интервале 300–500 Å. Толщина слоя металла обуславливается равномерной инжекцией электронов во все области собственного полупроводника, а также его низкоомностью и в среднем составляет 2 мкм.

Нижние слои фотодиодов обратной проводимости формируются легированием верхних слоев акцепторной примесью, причем оптимальная суммарная толщина обоих р-п-слоев фотодиодов матрицы составляет в среднем $3L$.

Толщина окисного слоя соответствует сумме толщины нижнего слоя фотодиода и половине толщины его верхнего слоя. Такая толщина диэлектрика обеспечивает высокую электроизоляцию фотодиодов матрицы между собой и надежное соединение всех верхних слоев фотодиодов со слоем собственного полупроводника.

Оптические каналы, выполненные в полупроводниковом основании, предотвращают попадание фононных либо фотонных потоков от других излучающих поверхностей.

Это существенно повышает чувствительность и точность показаний устройства и его разрушающую способность, вследствие устранения локальных помех на каждом из фотодиодов от сигналов посторонних оптических излучений.

Оптимальная длина оптических каналов, которая позволяет получить максимальное ослабление фононных и фотонных потоков – помех, зависит от диаметра канала \varnothing и составляет, как показатели результаты эксперимента, отношение $\Delta = \ell/\Phi = 100$.

В рабочем состоянии омический контакт полупроводникового слоя подсоединяется к земляной клемме, а к металлическому слою подводит-

ся напряжение постоянного тока такой полярности, чтобы осуществлялась инжекция электронов с поверхности металла в слой собственного полупроводника, то есть напряжение отрицательной полярности.

Плотность тока через контакт металл-полупроводник определяется выражением

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

и экспоненциально возрастает с повышением питающего напряжения.

В (1) J_s – ток насыщения; e , k , T – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. В результате отбора энергии инжектированными электронами от кристаллической решетки собственного полупроводника его температура, а следовательно температура фотодиодной матрицы понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_n = \Pi I t, \quad (2)$$

где Π – коэффициент Пельтье, $I = J S$ – ток, протекающий через барьер Шоттки сечением S ; t – время протекания тока.

Матрица фотодиодов чувствительной стороной, т.е. оптическими каналами, устанавливается возле излучаемой фононный (фотонный) поток нагретой поверхности элемента, температура которого контролируется. Съём информации с фотодиодов устройства осуществляется сканирующим электронным лучом, в цепи которого включено нагрузочное сопротивление. Нагрузочное сопротивление при помощи конденсатора подключается на вход измерительной части устройства, например к его усилительному тракту.

Перед измерением температуры объекта путем подачи напряжения к слою металла осуществляют быстрое (2–5) мин охлаждение устройства в среднем на 20 °С в сравнении с температурой окружающей среды. После термостабилизации устройства осуществляют измерение температуры соответствующих элементов. При контроле температуры нагретых тел на каждый элемент фотодиода матрицы поступает фононный поток J_v , интенсивность которого и энергия их пропорциональны излучаемой температуре. Каждый охлаждаемый фотодиод, представляющий полупроводниковый р-п переход, который обладает емкостью C , накапливает электрический заряд $Q = CU_x$, где U_x – фотоэдс, р-п перехода, вследствие разделения генерируемых фотоносителей на р-п переходах. Заряд Q пропорционален интенсивности потока и энергии $W = h\nu$ падающих фононов (фотонов), т.е. температуре поверхности контролируемого нагретого тела.

Электронный луч, например генерируемый электронной пушкой, сканирует по поверхности

матрицы фотодиодов преобразователя, поочередно замыкая цепь фотодиода. В результате на вход усилителя измерительного устройства поступает сигнал, пропорциональный накопленному на р-п переходе фотодиода заряду т.е. контролируемой температуре. Усиленный сигнал, формируемый преобразователем тепловых полей подается на вход регистрирующего прибора: самописца, осциллографа, видеоконтрольного устройства и т.д., который показывает истинное значение температуры поверхности контролируемого нагретого тела. Основные параметры преобразователя: вольт-

ватная чувствительность $S = 1,4 \text{ В/Вт}$, пороговая чувствительность $Q_{\text{пор}} = 4,58 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$, инерционность 10^{-8} с , диапазон контролируемых температур $T = 0-1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Литература

1. Сафронов, Ю. П. Инфракрасная техника и космос / Ю. П. Сафронов, Ю. Г. Андрианов. – М. : Сов. Радио, 1998. – 376 с.
2. Ветохин, С. С. Одноэлектронные фотоприемники / С. С. Ветохин. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 160 с.

УДК 621.317

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НАГРЕВАТЕЛЕМ ИЗ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Таратын И.А., Козуля А.А., Рысик А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе рассматривается конструкция и характеристики газового сенсора, реализованные на кремниевой подложке, с использованием планарной технологии. При измерениях выходного сигнала в качестве нагревательного элемента были использованы оксиды металлов III-й группы таблицы Менделеева, которые одновременно являлись газочувствительным слоем. Данная конструкция обеспечивает высокую чувствительность к воздействию оксида азота с концентрацией 2 ppm и оксида углерода с концентрацией 11,8 ppm.

Ключевые слова: полупроводниковые химические сенсоры, оксид азота, газовый сенсор.

SEMICONDUCTOR GAS SENSOR WITH METAL OXIDE HEATER

Taratyn I., Kozulya A., Rysik A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. In this paper, the design and characteristics of a gas sensor implemented on a silicon substrate using planar technology are considered. When measuring the output signal, metal oxides of the III group of the periodic table were used as a heating element, which simultaneously served as a gas-sensitive layer. This design provides high sensitivity to the effects of nitric oxide with a concentration of 2 ppm and carbon monoxide with a concentration of 11.8 ppm.

Key words: semiconductor chemical Sensors, nitrogen oxide, gas sensor.

*Адрес для переписки: Таратын И.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tarigal@yandex.ru*

Газовый сенсор представляет кристалл кремния размером $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм на поверхности которого сформирован слой SiO_2 и платиновый резистор, сопротивлением 15 Ом. Кристалл разварен платиновой проволокой, диаметром 20 мкм в 4-х выводной корпус. На поверхности кристалла из раствора сформирован газочувствительный слой, температура формирования которого достигала $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Для определения температуры кристалла, при которой достигается максимальный выходной сигнал была определена зависимость температуры от мощности, подаваемой на нагревательный элемент из оксида металла Me_2O_3 . Полученные результаты представлены на рис. 1.

Температура контролировалась с помощью прибора IP-140.

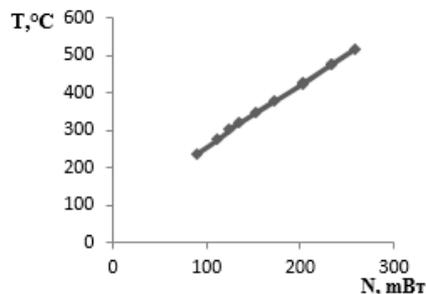


Рисунок 1 – Зависимость температуры кристалла (T , $^\circ\text{C}$) от мощности нагрева

В данной работе исследовались характеристики 2-х электродного газового сенсора, кон-