

УДК 531.7

## Оптoемкoстный преобразователь

В. А. ВАСИЛЬЕВ

Пензенский государственный университет,  
ул. Красная, 40, Пенза 440017 (Россия)

E-mail: paspen73@hotmail.com

### Аннотация

Предлагается оптоемкостный преобразователь, способный преобразовывать оптическую энергию в электрический сигнал через изменение емкости твердотельной структуры. В нем использовано свойство полупроводников изменять поверхностное сопротивление при воздействии оптического излучения. Емкость твердотельной структуры изменяется за счет изменения поверхностного сопротивления арсенида галлия (GaAs). Оптоемкостный преобразователь позволяет обнаруживать наличие оптического излучения, измерять изменение емкости в зависимости от изменения ширины светового пятна, мощности и частоты оптического излучения.

Известны различные типы преобразователей физических и механических величин [1–4]. Принцип действия большинства из них основывается на физико-химических свойствах материалов. Применение полупроводниковых материалов в преобразователях различных величин является весьма перспективным направлением.

Для преобразования оптической энергии в электрический сигнал применяются фотодиоды, фоторезисторы, болометры, оптоакустические преобразователи и др. [5]. Однако не всегда перечисленные преобразователи оптической энергии в электрический сигнал удобны для использования.

Предлагается оптоемкостный преобразователь, способный преобразовывать оптическую энергию в электрический сигнал через изменение емкости твердотельной структуры. Он основан на свойстве полупроводников изменять поверхностное сопротивление при воздействии оптического излучения. Емкость твердотельной структуры изменяется за счет изменения поверхностного сопротивления полупроводника.

Оптоемкостный преобразователь (рис. 1) представляет собой твердотельную структуру, состоящую из диэлектрической подложки 1, двух металлических пластин 2 и 3 (расположенных в одной плоскости), диэлектри-

ческого слоя 4 и полупроводникового слоя (пластины) 5. В качестве диэлектрической подложки 1 могут служить керамика или стекло. Металлические пластины 2 и 3 формируются на подложке 1 и покрываются тонким слоем диэлектрика (целесообразно использовать монооксид кремния – SiO). Полупроводниковый слой 5 (к примеру, из арсенида галлия – GaAs) наносится на диэлектрический слой 4. Вместо полупроводникового слоя 5 может использоваться тонкая полупроводниковая пластина (закрепленная на диэлектрическом слое 4). Электрические выводы *a* и *b* служат для подключения оптоемкостного преобразователя к преобразователю емкости в электрический сигнал.

При облучении поверхности полупроводникового слоя (пластины) 5 (см. рис. 1) оптическим излучением с длиной волны больше ширины запрещенной зоны в поверхностном слое полупроводника образуется избыточная концентра-

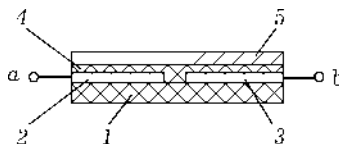


Рис. 1. Твердотельная структура оптоемкостного преобразователя: 1 – диэлектрическая подложка; 2 и 3 – металлические пластины; 4 – диэлектрический слой; 5 – полупроводниковый слой.

ция свободных носителей заряда. Это приводит к уменьшению поверхностного сопротивления полупроводника. Возрастает проводимость поверхностного слоя. Поверхностный слой с избыточной концентрацией свободных носителей заряда начинает выполнять функции третьей проводящей пластины, расположенной параллельно первым двум металлическим пластинам 2 и 3. При этом глубинные области полупроводникового материала выполняют функцию диэлектрика. Как известно, диэлектрическая проницаемость полупроводников довольно высока ( $\epsilon \sim 11-14$ ), а емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости. В результате наблюдается существенное изменение емкости между двумя металлическими пластинами.

Для преобразования емкости твердотельной структуры (см. рис. 1) в электрический сигнал удобно использовать сравнение преобразуемой емкости  $C_x$  с опорной величиной  $C_o$ . В качестве опорной величины целесообразно выбирать емкость конденсатора, соизмеримую с емкостью твердотельной структуры.

Получение высокой чувствительности емкостного преобразователя возможно с использованием мостовых измерительных цепей, при этом достигается чувствительность  $\Delta C/C$  до  $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-13}$ .

Принципы построения операционных преобразователей изложены в работе [6]. На рис. 2-4 представлены различные электрические схемы операционных преобразователей емкости в электрический сигнал. Каждая из них может быть использована совместно с оптоемкостным преобразователем, представленным на рис. 1.

Электрическая схема преобразователя емкости твердотельной структуры в электрический сигнал, изображенная на рис. 2, относится к типу автокомпенсационных. Она представляет собой цепь с уравниванием противофазных токов, протекающих через измерительную ветвь, содержащую измеряемую емкость  $C_x$  и опорную ветвь с опорной емкостью  $C_o$ . Выходное напряжение такой измерительной цепи определяется выражением

$$U_{out} \cong U_{in} \frac{C_x}{C_o} \frac{1}{1 + \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{C_o}{C_x} + \frac{C_{c2}}{C_x} \right)} \quad (1)$$

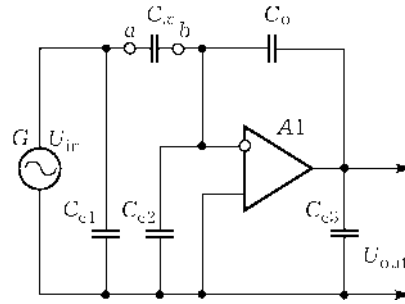


Рис. 2. Схема преобразователя емкости твердотельной структуры в электрический сигнал.

где  $U_{out}$  и  $U_{in}$  – выходное и входное напряжение измерительной цепи,  $k$  – коэффициент усиления операционного усилителя на несущей частоте,  $C_{c2}$  – емкость экранированного провода.

Анализ выражения (1) показывает, что рассматриваемую измерительную цепь удобно использовать для преобразования в напряжение, поскольку при больших  $k$  она практически линейна. Емкости экранированных проводов  $C_{c1}$  и  $C_{c3}$  слабо влияют на функцию преобразования. Влияние экранированных проводов уменьшается с уменьшением выходного сопротивления генератора входного сигнала и операционного усилителя. Благодаря глубокой отрицательной обратной связи, охватывающей операционный усилитель, его входное сопротивление, а следовательно, и напряжение на его инвертирующем входе очень мало. Это обстоятельство позволяет вне зависимости от длины экранированной линии связи и соответственно от емкости  $C_{c2}$  оставлять неизменной измерительную цепь. Однако при этом необходимо использовать операционный усилитель с достаточно высоким быстродействием и большим коэффициентом усиления.

Электрическую схему, представленную на рис. 2, удобно использовать для измерений в широком температурном диапазоне. Она позволяет размещать твердотельную структуру (оптоемкостного преобразователя) емкостью  $C_x$  и опорный конденсатор емкостью  $C_o$  на удалении от преобразователя емкости в электрический сигнал. В качестве конденсатора  $C_o$  можно использовать аналогичную твердотельную структуру, помещенную в тень.

К недостаткам этой электрической схемы можно отнести сложность обеспечения устой-

чивости операционного усилителя и стабилизации его режима по постоянному току при больших коэффициентах усиления  $k$ . Устранить этот недостаток можно путем увеличения внутреннего сопротивления операционного усилителя, например, увеличением постоянной времени операционного усилителя с помощью корректирующей цепи или за счет включения последовательно с его выходом добавочного резистора.

На рис. 3 показана электрическая схема преобразователя емкости твердотельной структуры в электрический сигнал с Т-образной корректирующей цепью из резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсатора  $C_1$ . Т-образная цепь обеспечивает стабилизацию режима операционного усилителя по постоянному току. Особенностью данной схемы является то, что она имеет резонансный пик усиления на частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{C_1 \cdot C_0}.$$

Для минимизации динамической погрешности требуется выполнить соотношение  $f_{\text{вх}} \gg f_0$ ,  $f_0 \gg f_{\text{п}}$ , где  $f_{\text{вх}}$  – частота напряжения питания,  $f_0$  – частота резонанса измерительной цепи, а  $f_{\text{п}}$  – частота измерительного процесса.

С точки зрения расширения полосы пропускания преимущество имеет цепь отрицательной обратной связи по постоянному току в виде шунтирующего резистора  $R_1$  (рис. 4), включаемого между инверсным входом и выходом операционного усилителя  $A_1$ . В этом случае необходимо выполнение условия  $f_{\text{вх}} \gg 1/(2\pi R_1 C_0)$ , из которого выбирается значение  $R_1 \gg 1/(2\pi f_{\text{вх}} C_0)$ . Введение шунтирующего резистора приводит к смещению выходного напряжения по постоянному уровню и, следовательно, к уменьшению диапазона

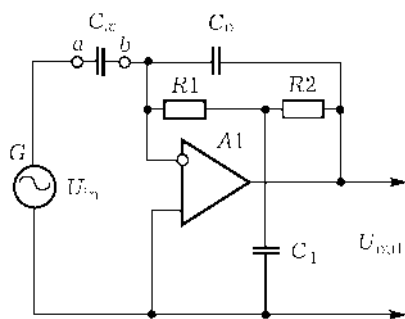


Рис. 3. Схема преобразователя емкости в электрический сигнал с Т-образной R-C-R цепью обратной связи.

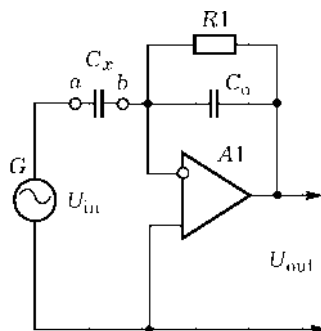


Рис. 4. Схема преобразователя емкости в электрический сигнал с шунтирующим резистором в цепи обратной связи.

выходного напряжения операционного усилителя. В результате снижается чувствительность преобразователя.

Экспериментальные исследования оптоемкостного преобразователя проводились с использованием установки, блок-схема которой показана на рис. 5. Оптическое излучение от источника 1 в широком спектральном диапазоне подавалось через оптическую систему 2 на монохроматор 3. С его выхода монохроматическое излучение направлялось на твердотельную структуру 4 оптоемкостного преобразователя. Электрические выводы  $a$  и  $b$  твердотельной структуры 4 соединялись со входом преобразователя емкости в электри-

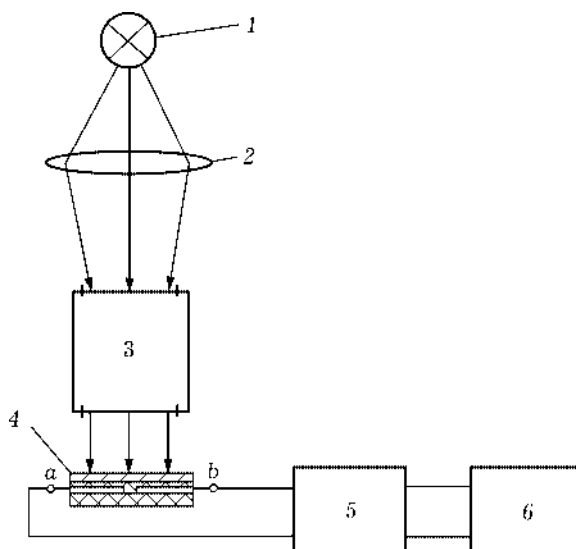


Рис. 5. Блок-схема установки для экспериментальных исследований оптоемкостного преобразователя: 1 – источник оптического излучения; 2 – оптическая система; 3 – монохроматор; 4 – твердотельная структура оптоемкостного преобразователя; 5 – преобразователь емкости в электрический сигнал; 6 – регистрирующее устройство.

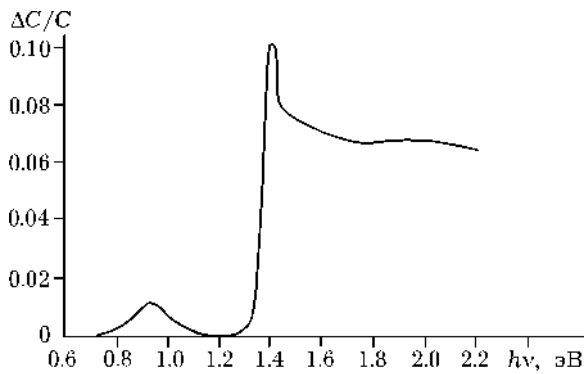


Рис. 6. Зависимость относительного изменения емкости твердотельной структуры оптоемкостного преобразователя от энергии фотонов ( $T = 300$  К).

ческий сигнал 5. Изменение емкости контролировалось и записывалось регистрирующим устройством 6. В качестве регистрирующего устройства в простейшем случае может быть использован вольтметр.

На рис. 6 представлена спектральная зависимость относительного изменения емкости твердотельной структуры (см. рис. 1), измеренная при температуре 300 К. В качестве полупроводникового слоя 5 (см. рис. 1) применялся арсенид галлия – GaAs (площадь  $35 \text{ мм}^2$ , толщина 0.4 мм), имеющий следующие характеристики: ориентация [100], удельное сопротивление  $1.7 \cdot 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , подвижность носителей заряда  $\mu = 2215 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . В области энергий фотонов 1.3–1.45 эВ (см. рис. 6) четко проявляется край собственного поглощения, а в области 0.75–1.1 эВ наблюдается примесная полоса поглощения.

Известно, что оптические свойства полупроводников, в частности GaAs, определяются зонной структурой. Зонная структура GaAs представлена на рис. 7 [7]. Край собственного поглощения в GaAs соответствует вертикальным переходам между экстремумами двух зон при  $k = 0$ . Ширина запрещенной зоны при температуре 300 К имеет значение  $\sim 1.43$  эВ, что хорошо согласуется с результатами эксперимента (см. рис. 6).

Кристаллы и эпитаксиальные слои GaAs с высоким удельным сопротивлением ( $\sim 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) можно получить путем легирования арсенида галлия железом или хромом. Fe и Cr создают глубоколежащие энергетические уровни акцепторного типа и являются высокоэффективными рекомбинационными

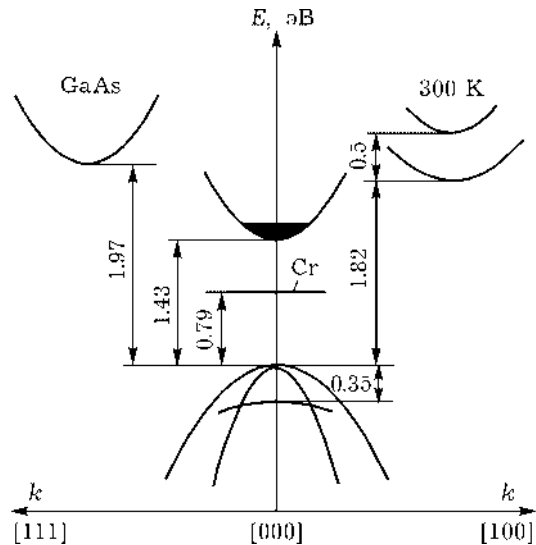


Рис. 7. Энергетическая зонная диаграмма GaAs.

ловушками. Энергии ионизации этих примесей составляют 0.52 (Fe) и 0.79 эВ (Cr) [7]. Из спектральной зависимости относительного изменения емкости (см. рис. 6) видно, что в полупроводниковом слое исследованной твердотельной структуры присутствует примесь Cr. Ее наличие объясняет поглощение в области от 0.75 до 1.1 эВ. Уровень энергии ионизации Cr, показанный на рис. 7, находится в запрещенной зоне между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны.

Экспериментальные исследования оптоемкостного преобразователя показали, что емкость структуры достаточно чувствительна к изменению ширины светового пятна  $s$  и мощности излучения  $P$ . Оптоемкостный преобразователь позволяет обнаруживать наличие оптического излучения, измерять изменение емкости в зависимости от изменения ширины светового пятна, мощности и частоты оптического излучения.

Достоинством оптоемкостного преобразователя является то, что он может быть изготовлен с применением планарной технологии микроэлектроники. При этом возможно использование полупроводниковых слоев (пластин), толщина которых меньше, чем диффузионная длина свободных носителей заряда.

Существенное преимущество оптоемкостного преобразователя заключается в расширенных функциональных возможностях. Наряду с возможностью контроля, регистрации и преобразования оптического излучения в элек-

трический сигнал он позволяет осуществлять регистрацию и контроль расстояния до металлических объектов.

На основе оптоемкостного преобразователя возможно создание различных устройств обнаружения и регистрации светового сигнала, контроля мощности оптического излучения, преобразователей оптической энергии в электрический сигнал, различных датчиков перемещения, силы, давления и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 В. А. Васильев, Э. М. Зайцев, А. И. Тихонов, *Изв. вузов. Приборостроение*, 10 (1984) 47.
- 2 В. А. Васильев, Там же, 11 (1987) 34.
- 3 В. А. Васильев, А. В. Горбачева, С. Е. Тельпов, А. И. Тихонов, А. с. 1420407 СССР, 1988.
- 4 В. А. Васильев, Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе: Труды конф., Ялта-Гурзуф, 18-28 мая 2000 г., с. 182-186.
- 5 В. А. Васильев, Исследование свойств элементов оптоэлектроники: Методические указания к лабораторным работам по курсу «Оптоэлектроника и интегральная оптика», Изд-во Пенз. техн. ун-та, Пенза, 1995.
- 6 В. С. Гутников, Интегральная электроника в измерительных устройствах, 2-е изд., Энергоатомиздат, Ленинград, 1988.
- 7 Справочник по электротехническим материалам, Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева, 3-е изд., т. 3, Энергоатомиздат, Ленинград, 1988.