

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЕМКОСТЬ–НАПРЯЖЕНИЕ

© 2011 г. С. Сакалаускас, З. Вайтонис\*, Р. Пурас\*

Кафедра физики полупроводников Вильнюсского университета  
Литва, 10222, Вильнюс, Саулетекио аллея, 9-III

\*Институт прикладных исследований Вильнюсского университета  
Литва, 10222, Вильнюс, Саулетекио аллея, 9-III

E-mail: romualdas.puras@ff.vu.lt

Поступила в редакцию 09.03.2011 г.

Описана принципиальная электрическая схема быстродействующего преобразователя электрической емкости–напряжение, приведены математические зависимости и экспериментальные результаты, касающиеся его основных параметров. Преобразователь позволяет повысить скорость изменения емкости на три-четыре порядка и оценить токи утечки или шунтирующие сопротивления, что полезно при измерениях вольт-фарадных характеристик.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Из множества известных методов и средств измерения электрической емкости, например [1–4], лишь отдельные позволяют проводить быстрые измерения и тем самым обеспечивать приемлемые величины динамических погрешностей. Этот вопрос особенно актуален при измерении вольт-фарадных характеристик, в частности полупроводниковых приборов, и для установок электроемкостной томографии. В некоторых случаях перечисленным выше требованиям соответствует способ измерения емкости с применением источника линейно изменяющегося напряжения, а добавочное введение компенсации емкости [5] позволяет еще на два-три порядка увеличить скорость измерения. Однако при измерении вольт-фарадных характеристик обеспечить оптимальную работу такого преобразователя во всем интервале изменения емкости очень трудно из-за необходимости регулирования коэффициента усиления усилителя.

В данной работе описан быстродействующий преобразователь электрической емкость–напряжение, использующий линейно изменяющееся напряжение. Для увеличения скорости измерения, т.е. уменьшения постоянной времени и повышения точности измерения, в преобразователь введена отрицательная обратная связь с корректирующими фильтрами в цепи, что позволило исключить необходимость регулировки коэффициента усиления усилителя при изменении измеряемой емкости.

### 2. ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЕМКОСТИ

Упомянутый способ увеличения скорости измерения или уменьшения постоянной времени преобразователя заимствован из схемотехнических решений быстродействующих электрометрических измерителей [6]. Упрощенная схема преобразователя емкости приведена на рис. 1.

Для рассматриваемой схемы, приняв, что напряжение источника  $E(t) = at$ , усилитель имеет переходную характеристику первого порядка, т.е.  $K(t) = -K_0 [1 - \exp(-t/\tau_0)]$ ,  $RC = R_1C_1$  и  $R \ll R_0$ .

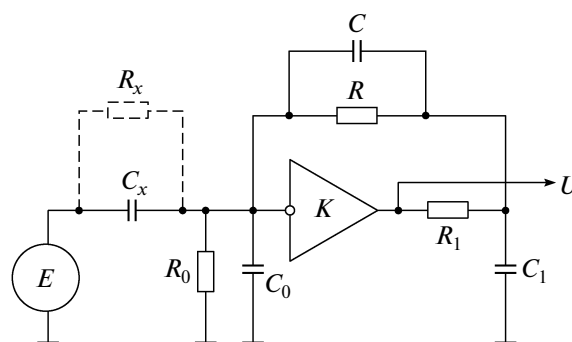


Рис. 1. Упрощенная схема преобразователя емкости.  $E$  – источник линейно изменяющегося напряжения;  $C_x$  и  $R_x$  – измеряемая емкость и (в некоторых случаях) ее шунтирующее сопротивление;  $R_0$  и  $C_0$  – соответственно входное сопротивление и емкость усилителя;  $RC$  и  $R_1C_1$  – корректирующие фильтры цепи обратной связи.

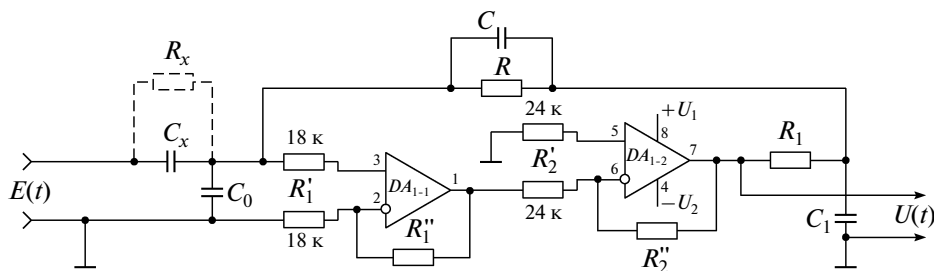


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема преобразователя емкости. DA<sub>1</sub> – TL072.

Для выходного напряжения преобразователя получим:

$$U(t) = -\frac{K_0}{1 + K_0} aRC_x [1 - \exp(-t/\tau_1)], \quad (1)$$

где эквивалентная постоянная времени

$$\tau_1 = R(C_x + C_0 + C)/(1 + K_0). \quad (2)$$

Приведенное выражение (1) действительно только в том случае, если соблюдается условие

$$\tau_0 \ll R(C_x + C_0 + C)/(1 + K_0), \quad (3)$$

в противном случае возникает самовозбуждение преобразователя.

При отсутствии цепочки R<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> эквивалентная постоянная времени увеличивается:

$$\tau' = RC + R(C_x + C_0)/(1 + K_0). \quad (4)$$

Учет шунтирующего сопротивления R<sub>x</sub> приводит к следующей зависимости выходного напряжения преобразователя:

$$U'(t) = -\frac{K_0}{1 + K_0} \{aRC_x [1 - \exp(-t/\tau_1)] + atR/R_x\}. \quad (5)$$

Полученные выражения были проверены экспериментально с преобразователем, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

Такой двухкаскадный усилитель обеспечивает достаточно большое входное сопротивление (DA<sub>1-1</sub>) и инвертирование фазы сигнала (DA<sub>1-2</sub>). Требуемый коэффициент усиления задавался сопротивлениями R<sub>1'</sub> и R<sub>2''</sub>. Величина сопротивления R подбиралась в пределах от 10 кОм до 140 МОм. Шунтирующая емкость C = 0.5–5 пФ выбиралась из соображения значительного превышения величины распределенной емкости резистора R.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Часть экспериментальных результатов в виде зависимости постоянной времени τ<sub>3</sub> от емкости C<sub>x</sub> и соответствующие им теоретические значения τ<sub>1</sub> и τ' приведены в таблице. В нашем случае: R = 1.4 · 10<sup>8</sup> Ом, C = 0.8 пФ, C<sub>0</sub> ≈ 4 пФ. Постоянная времени τ<sub>3</sub> определялась по длительности фронта t<sub>3</sub> выходного сигнала, отсчитанного между его уровнями от 0.1 до 0.9, имея в виду, что τ<sub>3</sub> = t<sub>3</sub>/2.2.

Другие экспериментальные результаты приведены на рис. 3 и 4. В этих экспериментах номиналы элементов были следующие: R = 10<sup>7</sup> Ом, C = 1 пФ, C<sub>0</sub> = 240 пФ.

Емкость C<sub>0</sub> была искусственно увеличена для выполнения неравенства (3), т.е. для исключения самовозбуждения при измерениях малых емкостей C<sub>x</sub>. Осциллограммы (рис. 3) показывают, что диапазон измеряемых емкостей может быть очень широк. Предварительные оценки позволяют утверждать, что измерения C<sub>x</sub> до значений 10<sup>-15</sup> Ф вполне возможны.

Осциллограммы, приведенные на рис. 4, позволяют оценить зависимость емкостных и резистивных составляющих параметров светодиода L450-06V фирмы Epitex от напряжения смещения. Это периодически повторяющееся (период T) пилообразное напряжение вида

$$E(t) = \begin{cases} U_0, & 0 < t \leq T/2; \\ U_0 + a(t - T/2), & T/2 < t \leq T. \end{cases}$$

При постоянном напряжении U<sub>0</sub> = -1.8 В поддерживается прямосмещенное состояние светодиода и его определенная емкость. При дальнейшем ли-

Постоянные времени преобразователя в зависимости от C<sub>x</sub> и K<sub>0</sub>

C <sub>x</sub> , пФ	K <sub>0</sub> = 100, τ <sub>0</sub> = 1.4 мкс			K <sub>0</sub> = 1000, τ <sub>0</sub> = 2.1 мкс			τ, мс (обратная связь отсутствует)
	τ <sub>3</sub> , мс	τ <sub>1</sub> , мс	τ', мс	τ <sub>3</sub> , мс	τ <sub>1</sub> , мс	τ', мс	
10	0.04	0.02	0.14	самовозбуждение			1.96
100	0.16	0.15	0.26	0.023	0.015	0.12	14.9
1000	1.58	1.42	1.55	0.152	0.142	0.25	141
10000	16.2	14.0	15.8	1.55	1.40	1.52	1400

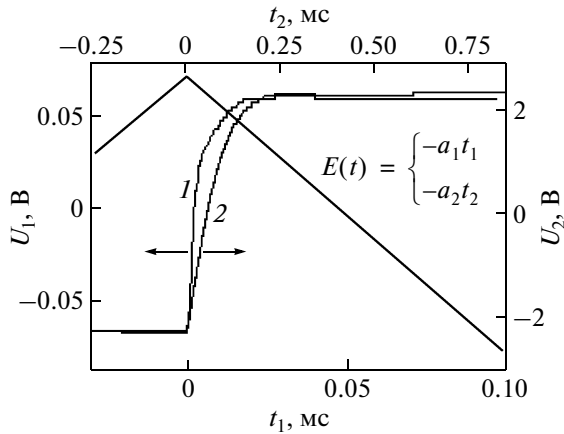


Рис. 3. Осциллограммы выходного напряжения: 1 –  $C_{x1} = 1$  пФ,  $a_1 = 6.2$  кВ/с; 2 –  $C_{x2} = 10$  нФ,  $a_2 = 22$  В/с.

нейном возрастании напряжения до 4.8 В светодиод переходит в обратносмещенное и даже предпробойное состояние, сопровождаемое заметным уменьшением сопротивления  $R_x$  перехода. Это связано с тем, что выходные напряжения преобразователя  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  линейно возрастают с увеличением коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , а в предпробойном режиме светодиода его сопротивление  $R_x$  зависит только от напряжения, что соответствует выражению (5).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный быстродействующий преобразователь электрическая емкость—напряжение с использованием источника линейно изменяющегося напряжения позволяет на три-четыре порядка повысить скорость измерения благодаря соответствующему уменьшению постоянной времени входной цепи. Реальный предел измерения емкости может достигать  $10^{-15}$  Ф, поскольку эффективно исключается влияние паразитных емкостей. Такой преобразователь емкости может быть полезен при измерении вольт-фарадных характеристик полупроводниковых приборов, поз-

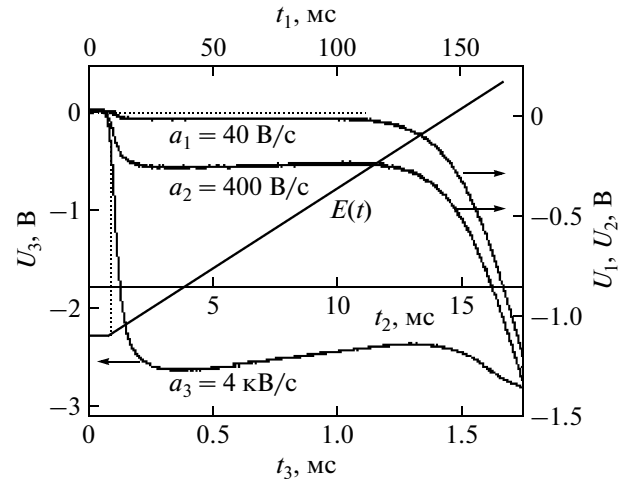


Рис. 4. Осциллограммы выходного напряжения при включении вместо  $C_x$  светодиода L450-06V при его переходе от прямосмещенного состояния к обратносмещенному.  $E(t)$  менялось от  $-1.8$  В до 4.8 В.

воля одновременно определять не только емкость, но и ее шунтирующее сопротивление.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерения в электронике: Справочник / Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Overcoming the Measurement Challenges of Advanced Semiconductor Technologies. <http://issuu.com/keithley/docs/overcoming>
3. *Styra D., Babout L.* // Electronics and Electrical Engineering. 2010. № 7(103). P. 47.
4. *Peng S.-Yu., Qureshi M.S., Hasler P.E. et al.* High SNR Capacitive Sensing Transducer. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1692800>.
5. *Sakalauskas S., Vaitonis Z., Pūras R., Bulbenkienė V.* // Electronics and Electrical Engineering. 2008. № 6(86). P. 73.
6. *Илюкович А.М.* Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976.