

ЛИТЕРАТУРА

1. Weckler G. P. Operation of p-n junction photodetectors in a photon flux integrating mode.— "IEEE J. Solid State Circuits", 1967, vol. SC-2, N 3, p. 65—73.
2. Weimer P. K., Sadasiv G., Meger J. E., Jr., Meray-Horvath L., Pike W. S. A self-scanned solid-state image sensor.— "Proc. IEEE", 1967, vol. 55, N 9, p. 1591—1602.
3. Берковский А. Г., Зайдель И. Н., Краснов В. Ф., Нестерихин Ю. Е., Туровский Л. А., Филимонов Г. А., Цукерман В. Г., Шувалов Л. Ф. Быстродействующие гибридные фоторегистрирующие приборы.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.
4. Альтман Л. Приборы с зарядовой связью в ЗУ и аналоговых процессорах.— «Электроника», 1974, т. 47, № 16, с. 25—38.
5. Бударных В. И., Домахин И. Г., Краснов В. Ф., Ли И. И., Ситникова И. И., Туровский Л. А., Цукерман В. Г. Электронно-усиливающая матрица для гибридного фотоэлектрического преобразователя.— «Автометрия», 1976, № 5, с. 21—25.
6. Бударных В. И., Краснов В. Ф., Туровский Л. А. Анализ характеристик коммутирующего диода ячейки фотоприемной матрицы.— «Автометрия», 1976, № 4, с. 109.
7. Краснов В. Ф., Петренко И. П. Оптимальный режим работы полупроводникового диода в матричных диод-диодных преобразователях оптической информации.— «Автометрия», 1979, № 3, с. 13—17.
8. Технология тонких пленок (справочник). Т. I. Под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. Пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. М., «Сов. радио», 1977.
9. Виноградов В. М., Зайдель И. Н., Краснов В. Ф., Куклев С. В., Цукерман В. Г., Шувалов Л. Ф. Матричный вакуумно-полупроводниковый фоторегистратор для ввода оптической информации в ЭВМ.— «Автометрия», 1978, № 3, с. 41—46.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. А. Ф. Трутко. М., «Энергия», 1973.
11. Кашлатый Р. Е., Кожевников А. М., Кругликов С. В., Телицин М. А., Фигуровский Е. А., Хлебникова Г. И., Юдина Л. П. Интегрально-гибридная фотоматрица для оптических ЗУ.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 50.
12. Бутт В. Е., Панков Б. Н. Быстродействующая фотоприемная матрица.— «Автометрия», 1976, № 6, с. 88—92.
13. Матиенко Б. Г. Основные характеристики и структуры больших интегральных фотоматриц голограммных запоминающих устройств.— «Автометрия», 1977, № 2, с. 39.
14. Martinelli R. U., Schultz M. L., Gossenberger H. F. Reflection and transmission secondary emission from GaAs.— "Appl. Phys.", 1972, vol. 43, N 11, p. 4803—4804.
15. Choisser J. P. Detecting photoelectron images with semiconductor arrays for multi-channel photon counting.— "Opt. Eng.", 1977, vol. 16, N 3, p. 262—266.
16. Золотухин Ю. Н. Разработка аппаратуры САМАС в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977.

Поступила в редакцию 21 ноября 1978 г.

УДК 621.382

В. Ф. КРАСНОВ, И. П. ПЕТРЕНКО

(Новосибирск)

ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО КЛЮЧЕВОГО ДИОДА В МАТРИЧНЫХ ДИОД-ДИОДНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В последние годы были созданы различные варианты вакуумно-полупроводниковых фоторегистраторов, содержащих на выходе интегральные электронно-приемные матрицы, работающие в режиме накопления заряда [1, 2]. Чувствительность приборов такого типа, благодаря эффекту катодоусиления, в сотни раз превышает чувствительность аналогичных фотоматриц, что позволяет существенно сократить период накопления информации. Чтобы обеспечить высокое быстродействие при-

боров, время считывания информации также должно быть уменьшено. Одним из вариантов выходной матричной структуры, обеспечивающим высокую скорость считывания, может служить диод-диодная схема [3]. В частности, в [4] описан гибридный фоторегистратор с диод-диодной электронно-приемной матрицей, время считывания информации с одной строки которой составляет $3 \cdot 10^{-8}$ с. Основным фактором, ухудшающим качество работы диод-диодной матрицы при быстром считывании, является большая относительная величина заряда переключения диода-ключа, приводящая к уменьшению отношения полезного сигнала к паразитному [3].

Настоящая работа проведена с целью нахождения минимально возможной величины относительного заряда переключения при различных длительностях промежутка считывания T и различных значениях параметра ключевого диода τ , а также определения формы импульса зарядного тока, при которой это минимальное значение реализуется. Мы определим и требование к форме считывающего импульса напряжения, обеспечивающего протекание через диод оптимального импульса тока.

Задача нахождения минимального заряда переключения и оптимальной формы импульса зарядного тока может быть решена безотносительно к ячейке матрицы и формулируется следующим образом. Пусть через диод за время T необходимо пропустить заряд Q_0 . Какова должна быть форма импульса тока, проходящего через диод, чтобы после переключения полярности величина заряда, вернувшегося в эмиттер, была минимальной? Иными словами, нужно найти зависимость $I(t)$, при которой отношение $S = Q_n/Q_0$ минимально ($0 < t < T$, Q_n — заряд переключения). Мы покажем ниже, что введенная величина S_{\min} — функция отношения T/τ , где τ — время рекомбинации носителей, инжектированных в базу диода, и найдем вид этой функции. По своей форме поставленная задача является вариационной, однако в данном случае решение может быть просто найдено при рассмотрении физических процессов в p - n -переходе. Можно предположить, что заряд переключения будет минимальным, если весь заряд Q_0 проходит через диод в самом начале интервала $[0, T]$. Действительно, в этом случае к моменту смены полярности наибольшая часть заряда Q_0 успевает рекомбинировать в базе диода. Тем не менее высказанное утверждение нуждается в доказательстве, так как величина Q_n зависит не только от рекомбинации до момента $t=T$, но и от того, сколько инжектированных в базу носителей успеют рекомбинировать уже после смены полярности, т. е. при $t > T$.

Итак, примем, что в оптимальном случае ток через диод должен определяться выражением

$$I(t) = Q_0 \delta(t). \quad (1)$$

Ниже будет показано, что такая зависимость тока от времени действительно обеспечивает минимальную величину относительного заряда переключения. Заряд переключения Q_n может быть найден интегрированием тока через диод после момента переключения:

$$Q_n = - \int_T^{\infty} I(t) dt. \quad (2)$$

Ток в цепи связан с напряжением на диоде следующим соотношением [5]:

$$I(t) = I_0 \int_0^t \frac{e^{-\frac{t-t'}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{t-t'}{\tau}}} e^{\frac{U(t')}{kT/q}} d\frac{t'}{\tau} + I_0 \tau \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t \frac{e^{-\frac{t-t'}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{t-t'}{\tau}}} e^{\frac{U(t')}{kT/q}} d\frac{t'}{\tau} - I_0. \quad (3)$$

После переключения (т. е. при $t > T$) значения функции $\frac{U(t)}{e^{kT/q}}$ становятся пренебрежимо малыми, поэтому интегрирование в (3) можно ограничить моментом $t=T$. Подставляя (3) в (2) и производя интегрирование, получим связь между зарядом переключения и зависимостью напряжения на диоде от времени $U(t)$ в период протекания прямого тока:

$$Q_n(T) = I_0 \tau \int_0^T e^{\frac{U(t)}{kT/q}} \left(\frac{e^{-\frac{T-t}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{T-t}{\tau}}} - \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{T-t}{\tau}} \right) dt \frac{t}{\tau}. \quad (4)$$

В каждом конкретном случае, если известна функция $U(t)$, выражение (4) дает возможность непосредственно вычислить заряд переключения. Однако в данной работе это соотношение используется для определения минимального относительного заряда переключения.

Предполагая, что через диод проходит δ -образный импульс тока (1), с помощью интегрального соотношения между током и напряжением на диоде (см. [5])

$$I_0 \left(e^{\frac{U(t)}{kT/q}} - 1 \right) = \int_0^t I(t') \frac{e^{-\frac{t-t'}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{t-t'}{\tau}}} dt' \frac{t'}{\tau} \quad (5)$$

получим зависимость напряжения на диоде от времени

$$\frac{U(t)}{e^{kT/q}} = \frac{Q_0}{I_0 \tau} \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{t}{\tau}}} + 1. \quad (6)$$

Подставив (6) в (4), найдем функцию $Q_n(T) = Q_\delta(T)$ при прохождении через диод δ -образного импульса тока*:

$$Q_\delta(T) = Q_0 \int_0^T \frac{e^{-t/\tau}}{\sqrt{\pi t/\tau}} \left(\frac{e^{-\frac{T-t}{\tau}}}{\sqrt{\pi \frac{T-t}{\tau}}} - \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{T-t}{\tau}} \right) dt \frac{t}{\tau}. \quad (7)$$

Относительный заряд переключения S_δ , как видно из (7), является функцией отношения T/τ , и после замены $T/\tau = \alpha$ и интегрирования первого слагаемого в (7) получим для S_δ

$$S_\delta = e^{-\alpha} - \int_0^\alpha \frac{e^{-x}}{\sqrt{\pi x}} \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha - x} dx. \quad (8)$$

С помощью разложения функции $\operatorname{erfc} \sqrt{\alpha - x}$ в ряд (см., например, [6]) и последующего интегрирования или другими методами (например, дифференцированием и последующим интегрированием по α функции $S_\delta(\alpha)$) можно показать, что правая часть (8) эквивалентна функции $\operatorname{erfc} \sqrt{\alpha}$, т. е.

$$S_\delta(\alpha) = \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha}. \quad (9)$$

* При подстановке (6) в (4) мы пренебрегли малым током I_0 .

Через функцию $S_\delta(T/\tau)$ может быть выражен заряд переключения для произвольной формы импульса прямого тока. Действительно, пусть за промежуток времени dt через диод прошел «прямой» заряд $I(t)dt$. Тогда $S_\delta(\alpha - t/\tau)$ определяет долю этого заряда, вернувшегося в эмиттер после переключения, т. е. $dQ_\pi = I(t)S_\delta(\alpha - t/\tau)dt$, и для полного заряда переключения

$$Q_\pi = \int_0^T I(t) S_\delta\left(\frac{T-t}{\tau}\right) dt. \quad (10)$$

Общее выражение для относительного заряда переключения, следовательно, таково:

$$S = \frac{\int_0^T I(t) \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{T-t}{\tau}} dt}{\int_0^T I(t) dt}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что $S_\delta = S_{\min}$. Действительно, так как $\operatorname{erfc} \sqrt{\alpha - t/\tau}$ — монотонно возрастающая функция t в интервале $[0, T]$, то величина S минимальна, когда весь «прямой» заряд переносится в момент $t=0$, т. е. когда $I(t) = Q_0 \delta(t)$. Таким образом, наше предположение об оптимальной форме импульса тока доказано; для минимального относительного заряда переключения из (9) получаем

$$S_{\min}(T/\tau) = \operatorname{erfc} \sqrt{T/\tau}. \quad (12)$$

Для диод-диодной фото- или электронно-приемной матрицы, опрашиваемой импульсами длительностью T и содержащей ключевые диоды с параметром τ , (12) определяет минимально возможную величину отношения шум/сигнал.

Определим, далее, форму входного импульса напряжения, обеспечивающего протекание в диод-диодной ячейке δ -образного импульса тока. Если уровень «фоторазряда» накопительной емкости C_Φ составляет величину ΔU_1 , то импульс напряжения, осуществляющий дозаряд емкости C_Φ до стандартного уровня U_0 (т. е. импульс, обеспечивающий прохождение в цепи тока $I_\Phi = C_\Phi \Delta U_1 \delta(t)$), должен иметь вид

$$U_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ U_0 + \frac{kT}{q} \left(\ln \frac{C_\Phi \Delta U_1}{I_0 \tau} e^{-t/\tau} \sqrt{\frac{t}{\tau}} + 1 \right), & t \geq 0. \end{cases} \quad (13)$$

Однако импульс (13) является функцией ΔU_1 , в то время как истинная величина разряда накопительной емкости обычно неизвестна. Для того чтобы импульс вида (13) мог быть использован для считывания информации, необходимо восстановление начального потенциала емкости в широком диапазоне уровней разряда. Проверим, в какой степени импульс (13) удовлетворяет этому требованию.

Пусть истинный фоторазряд емкости есть ΔU и предположим, что входной импульс индуцирует в цепи ток $I(t) = C_\Phi \Delta U_s \delta(t)$. Предстоит проверить, правильно ли это предположение, и, если это действительно так, определить зависимость $\Delta U_s(\Delta U, \Delta U_1)$.

Если в выражение для нестационарной ВАХ диода подставить предположенную функцию $I(t)$ и $U_{\text{вх}}(t)$ из (13), то, учитывая, что потенциал на емкости к началу считывания равен $U_0 - \Delta U$, можно убедиться, что

(5) обращается в тождество при следующем соотношении между ΔU_3 , ΔU и ΔU_1 :

$$\Delta U_3 = \Delta U - (kT/q) \ln(\Delta U_3/\Delta U_1). \quad (14)$$

Анализ (14) показывает: если выбрать ΔU_1 равным kT/q , то величина ΔU_3 близка к ΔU практически во всей области возможных значений ΔU , причем близость ΔU и ΔU_3 сохраняется и при уровнях разряда емкости порядка десятков милливольт, что позволяет рассматривать считывание информации импульсами вида (13) как способ увеличения чувствительности диод-диодной схемы.

Таким образом, в диод-диодных фото- и электронно-приемных матрицах при использовании импульсов специального вида может быть достигнута весьма высокая скорость считывания информации с сохранением удовлетворительного отношения сигнал/шум (так, из (12) следует, что при времени опроса строки 10 нс и параметре ключевых диодов τ , равном 40 нс, отношение светового сигнала к темновому приблизительно равно двум).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tull R. G., Choisser J. P., Snow E. H. Self-scanned digicon: a digital image tube for astronomical spectroscopy.— "Appl. Opt.", 1975, vol. 14, N 5, p. 1182—1189.
2. Mende S. B., Chaffee F. H. Single electron counting by self-scanning diode array in a kron-camera.— "Appl. Opt.", 1977, vol. 16, N 10, p. 2698—2702.
3. Бударных В. И., Домахин И. Г., Краснов В. Ф., Ли И. И., Ситникова И. И., Туровский Л. А., Цукерман В. Г. Электронно-усиливающая матрица для гибридного фотоэлектрического преобразователя.— «Автометрия», 1976, № 5, с. 21.
4. Берковский А. Г., Зайдель И. Н., Краснов В. Ф., Нестерихин Ю. Е., Туровский Л. А., Филимонова Т. А., Цукерман В. Г., Шувалов Л. Р. Быстродействующие гибридные фоторегистрирующие приборы.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1977, с. 61.
5. Бударных В. И., Краснов В. Ф., Туровский Л. А. Анализ характеристик коммутирующего диода ячейки фотоприемной матрицы.— «Автометрия», 1976, № 4, с. 109.
6. Двайт Г. В. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М., «Наука», 1964.

*Поступила в редакцию 25 июля 1977 г.;
окончательный вариант — 12 мая 1978 г.*

УДК 621.383.292 : 681.327.68.778.38

А. М. МЕЧЕТИН, В. И. МИЛЮТИН, В. Ю. ФЕДОРОВ

(Москва)

ВАКУУМНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭВМ

Большое внимание в последнее время уделяется развитию оптоэлектронных и, в частности, голографических запоминающих устройств (ЗУ) благодаря их преимуществам перед другими типами ЗУ, обладающих большой емкостью информации, более высоким быстродействием при считывании, более высокой надежностью хранения информации.

Один из важных элементов оптоэлектронного ЗУ — многоканальный фотоприемник, который преобразует записанную оптическую информацию в систему электрических сигналов, передаваемых затем на