

УДК 681.7.08

Г. Л. Лисенко, канд. техн. наук, доц.; Д. С. Костюченко, студ.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАСИВІВ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ RS-ТРИГЕРІВ

*Розглянуто побудову масивів асинхронних та синхронних RS-тригерів з використанням електроабсорбційних модуляторів світла та VCSEL (вертикально випромінюючих лазерів з об'ємним резонатором), їх режими функціонування та основні параметри.*

### Вступ

На сьогоднішній день кількість інформації, що передається та обробляється в обчислювальних системах постійно збільшується. Тому гостро стоїть задача створення ефективних засобів для її зберігання та обробки. Великорозмірні масиви даних ефективно оброблюються із застосуванням паралельних методів і засобів обробки інформації. Серед основних компонентів засобів паралельної обробки інформації можна виділити запам'ятовувальні пристрої, необхідні майже для будь-якої обчислювальної системи. Для елементів пам'яті особливо важливими є показники швидкодії, розміру та малого енергоспоживання з чим успішно справляються оптоелектронні системи та елементи.

Традиційна динамічна електронна пам'ять знайшла застосування практично у всіх сучасних обчислювальних пристроях. Однак вона не позбавлена недоліків — кожний раз, коли процесор здійснює вибірку даних з динамічного запам'ятовувального пристрою здійснюється перезарядка, перезапис вмісту пам'яті до того, як її знову можна буде використовувати. Для більшості динамічних запам'ятовувальних пристроїв час перезарядки не набагато менше, ніж час вибірки. Крім того, в динамічних запам'ятовувальних пристроях потрібна періодична регенерація (відновлення) інформації що зберігається в пам'яті. На регенерацію йде час, що становить в середньому 6...12 % від часу вибірки [1].

Крім того, за допомогою традиційних електронних елементів пам'яті (зокрема тригерів) є ускладненою одночасна паралельна обробка великорозмірних масивів інформації, що пов'язано з складною побудовою великої кількості виводів для елементів. Саме тому актуальною задачею є створення оптоелектронних елементів пам'яті, які б мали можливість об'єднання у масиви з паралельною обробкою та зберіганням інформації. Також важливим є можливість розташування масивів пам'яті у вигляді послідовно розташованих та оптично з'єднаних між собою каскадів. Що дозволяє паралельно обробляти великі масиви інформації.

### Постановка задачі

Як елементарні комірки оптоелектронних масивів пам'яті пропонується використовувати асинхронні та синхронні RS-тригери, оскільки вони є найпростішими оптоелектронними елементами пам'яті. Основними елементами комірок для побудови масивів оптоелектронних тригерів є електроабсорбційні модулятори світла та елементи масиву VCSEL [2].

Масиви синхронної та асинхронної оптоелектронної пам'яті працюють на пропускання оптичного сигналу без використання підсилюючих елементів, з можливістю створення послідовного з'єднання каскадів масивів оптоелектронної пам'яті з паралельним зберіганням інформації.

Основними елементами оптоелектронного асинхронного RS-тригера [3] та оптоелектронного синхронного RS-тригера є оптично керовані електроабсорбційні модулятори ОСЕАМ (Optically-controlled electroabsorption modulators), створені з великою кількістю квантових ям [4, 5], що працюють на основі ефекту Штарка в квантово-розмірних структурах у напівпровідниках [6]. Особливість побудови ОСЕАМ полягає у тому, що модулятор складається з двох вертикально вирощених один на одному шарів  $p$ - $i$ - $n$  діодів. Верхній  $p$ - $i$ - $n$ -діод є фотоприймачем (фотодіодом) для керуючого випромінювання, а нижній — модулятором для інформаційного променя.

Основою функціонування електроабсорбційних модуляторів є ефект Штарка у напівпровідниках з великою кількістю квантових ям; матеріал — GaAs/AlGaAs [6]. В них спостерігається зміна коефіцієнта поглинання зі зміною зовнішньої напруги. Результат дослідження отриманих експериментальних залежностей виявив, що в певних діапазонах прикладеної напруги до електроабсорбційного модулятора світла на певних довжинах хвиль спостерігаються різні залежності коефіцієнта поглинання — від збільшення до зменшення, як зі зменшенням прикладеної напруги, так і з її збільшенням. Це дає змогу керувати пропусканням світла за допомогою напруги, а також визначати рівні логічного нуля та логічної одиниці електроабсорбційного модулятора в залежності від його коефіцієнтів поглинання. Для керування електроабсорбційними модуляторами у оптоелектронних елементах пам'яті використовується діапазон робочих напруг 0...4 В зі значенням логічної одиниці 0...1 В, а логічного нуля — 3...4 В, з використанням довжини хвилі оптичного сигналу живлення 855 нм [2].

У побудові масивів оптоелектронної пам'яті існують певні проблеми, якщо використовуються відомі оптоелектронні запам'ятовувальні пристрої. Наприклад, відомі елементи оптоелектронної пам'яті, зокрема динамічний оптичний запам'ятовувальний пристрій на волоконно-оптичних лініях [7], який побудовано на волоконно-оптичних світловодах та комутаційних пристроях для введення та виведення інформації. Його недоліками є достатньо великі розміри через використання закільцьованої ділянки оптичного волокна та складність виготовлення у інтегральному виконанні і побудові послідовних каскадів цих пристроїв.

Також відомий елемент оптоелектронної пам'яті, в якому за порогові елементи використовуються оптичні бістабільні елементи (ОБЕ) [8]. Управління станом ОБЕ здійснюється виключно оптичним шляхом за рахунок організації двостороннього симетричного зворотного зв'язку між ОБЕ за відбитим світловим потоком. Однак різні рівні вхідних та вихідних сигналів не дозволяють створювати послідовне з'єднання каскадів на основі ОБЕ.

Для усунення вищезазначених недоліків, зокрема складності виготовлення в інтегральному виконанні і побудові послідовних каскадів масивів оптоелектронної пам'яті, пропонується розробка інтегральних елементів пам'яті, які працюють на пропускання оптичного сигналу без використання підсилювальних елементів, з можливістю створення послідовного з'єднання каскадів масивів оптоелектронної пам'яті з паралельним зберіганням великорозмірних масивів даних.

### Основна частина

Розглянемо роботу комірки масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на прикладі оптоелектронного асинхронного RS-тригера [3] із використанням елементів масиву VCSEL для забезпечення вхідного оптичного сигналу живлення (рис. 1). Елементи масиву VCSEL забезпечують постійний оптичний сигнал, що поступає на вхід кожного електроабсорбційного модулятора ОЕАМ (оптичний сигнал живлення  $F$ ) [9]. Інформаційні входи  $S$  та  $R$  і виходи використовують однакові рівні оптичного сигналу, що дозволяє створювати каскади комірок пам'яті. Швидкодія пристрою забезпечується відсутністю елементів з великим часом перемикавання та використанням за оптичні інформаційні входи оптично керовані швидкісні подвійні діоди з часом перемикавання до 20 пс [10].

Оптоелектронний асинхронний RS-тригер містить два подвійних діоди DD1 та DD2 (Double-diode), два електричних джерела живлення E1 та E2, два резистори R1 та R2, чотири електроабсорбційних

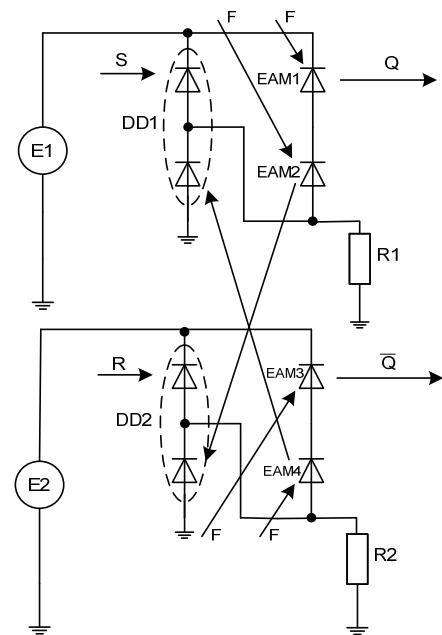


Рис. 1. Оптоелектронний асинхронний RS-тригер

модулятора світла EAM два оптичні інформаційні входи  $S$  та  $R$ , два оптичні виходи  $Q$ ,  $\bar{Q}$ . Вхід кожного електроабсорбційного модулятора з'єднаний з оптичним джерелом живлення  $F$ , в

якості якого використовується відповідний елемент масиву VCSEL. Перший оптичний вхід DD1 є першим інформаційним входом тригера —  $S$ , а перший вхід DD2 є інформаційним входом тригера  $R$ . — Оптичні виходи EAM1 та EAM3 є прямим та інверсним оптичними виходами пристрою  $Q, \bar{Q}$ . За допомогою сигналів оптичного живлення  $F$  здійснюються внутрішні зв'язки у тригері та формуються прямий  $Q$  та інверсний  $\bar{Q}$  оптичні виходи тригера. Оптичний сигнал  $Q$  та  $\bar{Q}$  визначається проходженням сигналу оптичного живлення  $F$  через керувані прикладеною напругою EAM1 та EAM3, відповідно. Аналогічно внутрішні зв'язки, що під'єднані до другого оптичного входу DD1 і DD2 через EAM2 та EAM4 зв'язані з сигналами оптичного живлення  $F$ . Оптичні інформаційні сигнали  $S$  та  $R$  однакові за рівнями з сигналами оптичного живлення  $F$ , що забезпечується використанням однакових масивів VCSEL. Наявність оптичного сигналу сприймається як логічна одиниця, а відсутність — як логічний нуль.

Оптоелектронний асинхронний RS-тригер працює так:

1. Початковий стан  $S = R = 1$ ;
2. Тривалість сигналу  $\tau_S > \tau_R \Rightarrow U_{R1} \uparrow \Rightarrow U_{EAM1} = 0 \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1$ ;
3.  $U_{R2} \downarrow \Rightarrow U_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 0$ ;
4.  $S = 0 \Rightarrow U_{R1} = R1 \cdot I_{EAM1,2} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1_n$ ;
5.  $R = 1 \Rightarrow U_{R2} \uparrow \Rightarrow U_{EAM3,4} \downarrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^{\bar{Q}} = 0 \Rightarrow U_{R1} \downarrow \Rightarrow U_{EAM1,2} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 0$ ;
6.  $R = 0 \Rightarrow U_{R2} = R2 \cdot I_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^{\bar{Q}} = 1_n$ ;
7.  $S = 1 \Rightarrow U_{R1} \uparrow \Rightarrow U_{EAM1,2} \downarrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1 \Rightarrow U_{R2} \downarrow \Rightarrow U_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^{\bar{Q}} = 0$ ;
8.  $S = 0 \Rightarrow U_{R1} = R1 \cdot I_{EAM1,2} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1_n$ .

де  $U_{R1} \uparrow, U_{R1} \downarrow$  — зростання, спадання напруги на відповідному резисторі,  $U_{EAM1} \uparrow, U_{EAM1} \downarrow$  — зростання, спадання напруги на відповідному електроабсорбційному модуляторі світла. Значення  $S$  та  $R$  позначають наявність вхідного оптичного сигналу на відповідному інформаційному вході.

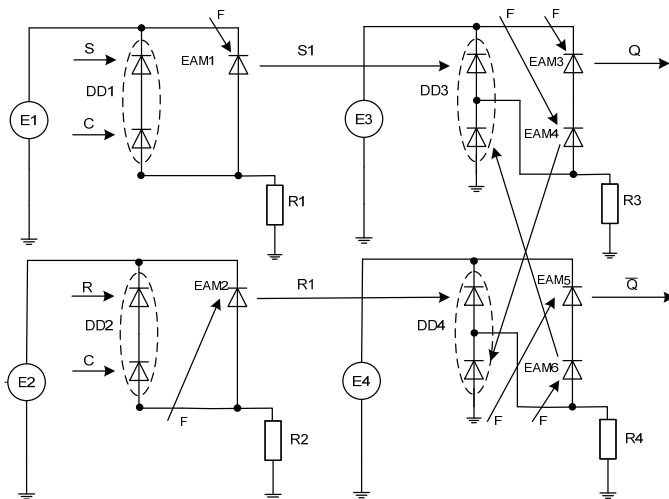


Рис. 2. Оптоелектронний синхронний RS-тригер

Перший оптичний вхід DD1 є інформаційним входом пристрою  $S$ , а перший вхід DD2 є інформаційним входом пристрою  $R$ . Оптичні виходи EAM3 та EAM6 є першим та другим оптичними виходами пристрою  $Q$  та  $\bar{Q}$ , відповідно.

Оптоелектронний синхронний RS-тригер створений за допомогою приєднання синхронізуючого каскаду до оптоелектронного асинхронного RS-тригера, тому функціонування його другого каскаду аналогічне оптоелектронному асинхронному RS-тригеру. Оптоелектронний синхронний RS-тригер працює так :

Як елемент оптоелектронної пам'яті для побудови масивів синхронної пам'яті використовується оптоелектронний синхронний RS-тригер (рис. 2).

Оптоелектронний синхронний RS-тригер містить чотири подвійних діода DD1...DD4 чотири електричних джерела живлення, чотири резистори R1...R4, шість електроабсорбційних модуляторів світла EAM, шість джерел оптичного живлення  $F$  два оптичні інформаційні входи  $S$  та  $R$ , два входи синхронізації  $C$  на які подається ідентичний сигнал (конструктивно можуть бути виконані у вигляді одного входу), два оптичні виходи  $Q, \bar{Q}$ .

Перший оптичний вхід DD1 є інформаційним входом пристрою  $S$ , а перший вхід DD2 є інформаційним входом пристрою  $R$ . Оптичні виходи EAM3 та EAM6 є першим та другим оптичними виходами пристрою  $Q$  та  $\bar{Q}$ , відповідно.

1. Початковий стан синхронізуючого каскаду  $S = R = 1, C = 0$ ;
2.  $U_{EAM1} \uparrow \Rightarrow S1 = 0, U_{EAM2} \uparrow \Rightarrow R1 = 0$ ;
3.  $S = R = 1, C = 1$ ;
4.  $U_{EAM1} \downarrow \Rightarrow S1 = 1, U_{EAM2} \downarrow \Rightarrow R1 = 1$ ;
5. Початковий стан другого каскаду  $S1 = R1 = 1$ ;
6. Тривалість сигналу  $\tau_{S1} > \tau_{R1} \Rightarrow U_{R3} \uparrow \Rightarrow U_{EAM3} = 0 \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1$ ;
7.  $U_{R4} \downarrow \Rightarrow U_{EAM5,6} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 0$ ;
8.  $S = 0, C = 1 \Rightarrow S1 = 0 \Rightarrow U_{R1} = R1 \cdot I_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1_n$ ;
9.  $R = 1, C = 1 \Rightarrow R1 = 1 \Rightarrow U_{R2} \uparrow \Rightarrow U_{EAM5,6} \downarrow \Rightarrow I_{\text{вих}} = 0 \Rightarrow U_{R3} \downarrow \Rightarrow U_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 0$ ;
10.  $R = 0, C = 1 \Rightarrow R1 = 0 \Rightarrow U_{R2} = R2 \cdot I_{EAM5,6} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^{\bar{Q}} = 1_n$ ;
11.  $S = 1, C = 1 \Rightarrow S1 = 1 \Rightarrow U_{R1} \uparrow \Rightarrow U_{EAM3,4} \downarrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1 \Rightarrow U_{R4} \downarrow \Rightarrow U_{EAM5,6} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^{\bar{Q}} = 0$ ;
12.  $S = 0, C = 1 \Rightarrow S1 = 0 \Rightarrow U_{R1} = R1 \cdot I_{EAM3,4} \uparrow \Rightarrow I_{\text{вих}}^Q = 1_n$ .

Значення  $C$  позначає наявність вхідного оптичного сигналу на вході синхронізації, інші позначення аналогічні позначенням для роботи оптоелектронного асинхронного RS-тригера.

На рис. 3 показано спрощену структурну схему масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера з використанням масиву VCSEL в якості джерела оптичного живлення. Горизонтальні сигнали позначають інформаційні сигнали пристрою  $S$  та  $R$ , а вертикальні – сигнали оптичного живлення  $F$ . Для прикладу показано матрицю асинхронних RS-тригерів розміром  $3 \times 4$  з оптичним живленням.

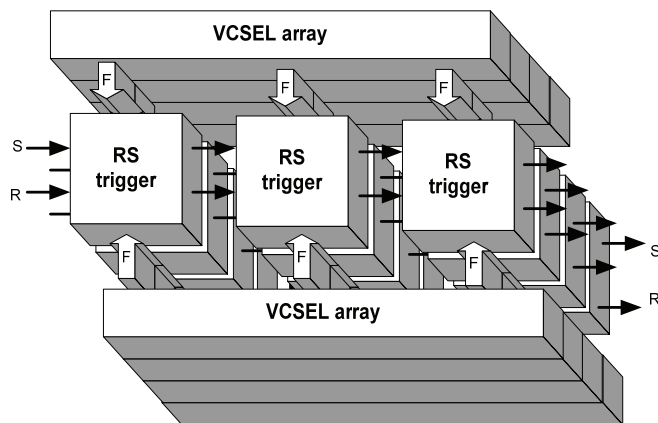


Рис. 3. Структурна схема масиву асинхронної оптоелектронної пам'яті з використанням масиву VCSEL як джерела оптичного живлення

Надзвичайно важливими є параметри швидкодії та часові характеристики пристрою. Визначимо їх для оптоелектронного асинхронного RS-тригера. Розрахунки для показаної на рис. 1 схеми є ускладненими, тому використаємо еквівалентну схему заміщення. Еквівалентною схемою заміщення  $p-i-n$  діода є ввімкнені паралельно ємність та опір, тому оскільки основними елементами електроабсорбційних модуляторів ОСЕАМ є два  $p-i-n$  діода, один з яких є фотоприймачем для керуючого випромінювання, а нижній – модулятором для інформаційного променя, то його схему заміщення можна подати у ви-

гляді двох схем заміщення  $p-i-n$  діода [11]. Схема заміщення включає в себе РС-структуру, з урахуванням диференційного опору та індуктивності виводів. Можливість побудови приладів з робочою частотою до 50 ГГц та стійкість електроабсорбційних модуляторів до високочастотних та надвисокочастотних коливань описано у роботі [11]. На рис. 4 показано еквівалентну схему оптоелектронного асинхронного RS-тригера з урахуванням схем заміщення.

Далі дослідимо часові характеристики еквівалентної схеми за допомогою аналізу перехідних процесів програми Micro-Cap 9. Виходячи з графіка, можна визначити, що час спрацювання схеми обмежується часом переднього фронту імпульсу напруги за виключенням 10 % часу з початку зростання фронту імпульсу з нульового стану та 10 % до встановлення в одиничний стан. Вважається, що за час 80 % тривалості переднього фронту імпульсу відбувається спрацювання схеми.

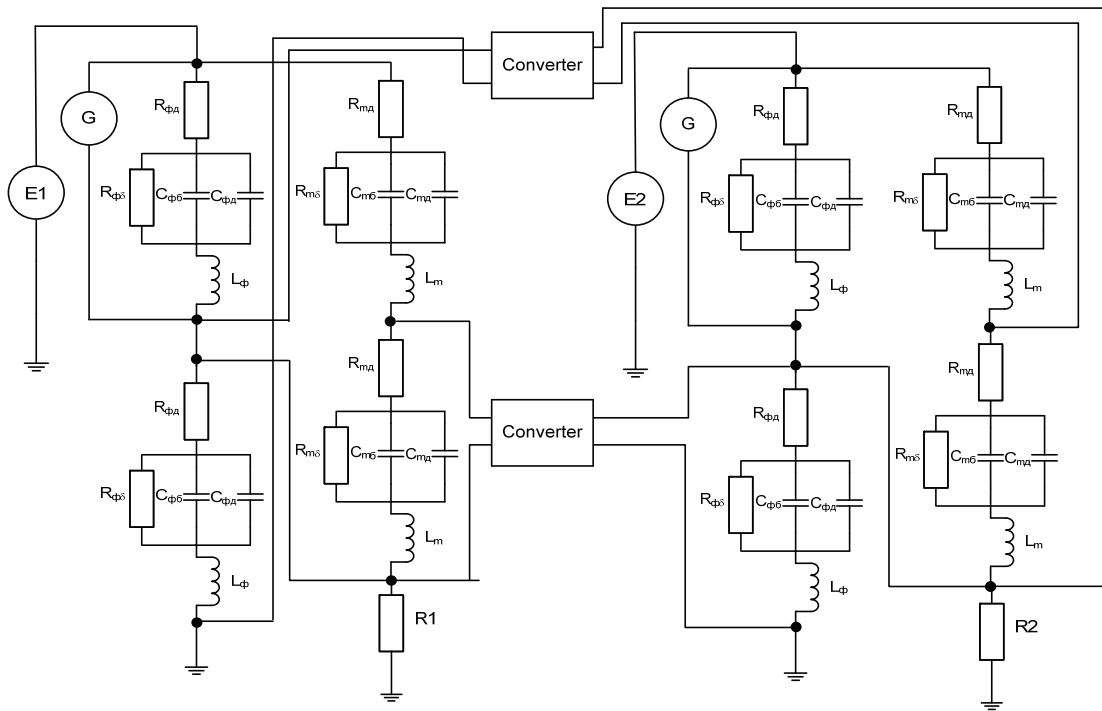


Рис. 4. Еквівалентна схема оптоелектронного асинхронного RS-тригера

Отже, приблизний час спрацювання оптоелектронного асинхронного RS-тригера

$$t_1 = (731,518 - 295,721)0,8 = 348,63 \text{ нс.}$$

Можна оцінити приблизну споживану потужність як відношення енергії переключення до часу спрацювання пристрою за формулою

$$P = \frac{E_{sw}}{t}.$$

Енергія переключення для робочої довжини хвилі 855 нм та напруги 9 В (за умови двох послідовно ввімкнених електроабсорбційних модуляторів світла) становить  $1,259 \cdot 10^{-13}$  Дж [9], отже з відомим часом спрацювання 348,63 нс споживана потужність становитиме  $P = 0,361$  мВт. Для масиву  $100 \times 100$  елементів сумарна споживана потужність становитиме 3,61 Вт. У зв'язку з особливостями формування ОСЕАМ наведена еквівалентна схема є оціночною, тому у подальшому результати можуть уточнюватись.

Період роботи масиву оптоелектронної асинхронної пам'яті становитиме суму часу спрацювання схеми оптоелектронного асинхронного RS-тригера та часу перемикання між елементами, який можна визначити по задньому фронту імпульсу напруги, зображеному на рис. 5.

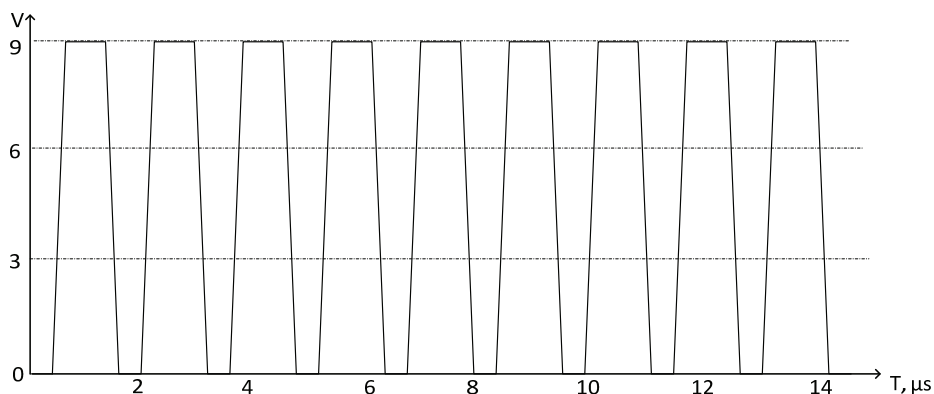


Рис. 5. Графік напруги, отриманий для еквівалентної схеми оптоелектронного асинхронного RS-тригера у програмі Micro-Cap 9

Виходячи з цього, оціночна частота роботи пристрою становитиме

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{348,63 \cdot 10^{-12} + 314,21 \cdot 10^{-12}} = 1,508 \text{ ГГц.}$$

### Висновки

Розглянуто будову та принципи роботи інтегральних елементів оптоелектронної пам'яті — оптоелектронного асинхронного RS-тригера та оптоелектронного синхронного RS-тригера, які працюють на пропускання оптичного сигналу без використання підсилювальних елементів, з можливістю створення послідовного з'єднання каскадів масивів оптоелектронної пам'яті з паралельним зберіганням великорозмірних масивів даних. Описано їх принципи роботи та стани функціонування. Розглянуто параметри швидкодії та енергоспоживання на прикладі еквівалентної схеми оптоелектронного асинхронного RS-тригера. Робоча частота масиву оптоелектронної пам'яті на основі оптоелектронного асинхронного RS-тригера становить 1,508 ГГц. Споживана потужність масиву 100×100 елементів становитиме 3,61 Вт. Показано структуру асинхронного масиву оптоелектронної пам'яті. Перевагами даного пристрою є паралелізм та можливість створення масивів пам'яті з високою швидкістю, що досягається швидким перемиканням елементів пристрою та відсутністю проміжних каскадів з високим часом перемикання. Масиви оптоелектронної пам'яті можуть бути використані в інформаційно-обчислювальних системах для побудови спеціалізованих обчислювальних пристроїв з паралельною обробкою інформації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ланина Э. П. Организация ЭВМ и систем : учеб. пос. / Э. П. Ланина ; Иркутский гос. техн. ун-т. — Иркутск : изд-во ИрГТУ, 2008. — 33 с.
2. Лисенко Г. Л. Побудова елементів оптоелектронної пам'яті з використанням електроабсорбційних модуляторів світла / Г. Л. Лисенко, Д. С. Костюченко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2012. — № 1(23). — С. 88—91.
3. Патент на корисну модель «Оптоелектронний асинхронний RS-триггер» №62527 / Лисенко Г. Л., Костюченко Д. С., Бурмакіна О. В. Зареєстровано в державному реєстрі патентів на корисні моделі 25.08.2011.
4. Vijit Sabnis. Optically-controlled electroabsorption modulators for future generation optical networks // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. — 2003. — P. 166—170.
5. Noah Charles Helman. Optoelectronic modulators for optical interconnects // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stratford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy — 2005. — P. 29—33.
6. Исследование эффекта Штарка вертикально сопряженных квантовых точек в гетероструктурах InAs/GaAs // Физика и техника полупроводников. — 2002. — Т. 36, вып. 9. — С. 1089—1096.
7. Цирульник С. М. Архітектура динамічних оптичних оперативних запам'ятовувальних пристроїв на волоконно-оптичних лініях : моногр. / С. М. Цирульник, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — С. 51—52.
8. Пат. Российской Федерации, G02F3/00, H03K23/78. Оптический триггер / Соколов С. В. — № 2040028; заявл. 10.02.1992.
9. Seurin, J.-F., Xu, G., Khalfin, V., Miglo, A., Wynn, J. D., Pradhan, P., Ghosh, C. L., and D'Asaro, L. A., «Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays.» Proc. SPIE 7229, 722903 (2009).
10. Micah Yairi, H.V. Demir, C.W. Coldren, J.S. Harris, and D.A.B. Miller «Demonstration of an optoelectronic dual-diode optically controlled optical gate with a 20 picosecond repetition period» Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications (NLO) KL, Hawaii August 6, 2000.
11. Micah B. Yairi. An optically controlled optoelectronic switch: from theory to 50 gigahertz burst-logic demonstration // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. — 2001. — P. 54—85.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Стаття надійшла до редакції 17.09.12  
Рекомендована до друку 11.10.12

**Лисенко Геннадій Леонідович** — доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки;  
**Костюченко Дмитро Сергійович** — студент Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.  
Вінницький національний технічний університет, Вінниця