

الاختبار التكنولوجي للأجهزة CCD الخطية

الدكتور فائق عراج*

(قبل للنشر في 2006/12/7)

□ الملخص □

يقدم هذا البحث نتائج قياس بعض البارامترات الخاصة الديناميكية للأجهزة CCD الخطية، ويطرح طرق بسيطة وسهلة لتحديد وقياس زمن التخزين وعامل الفقد الشحني. في هذا البحث تم اقتراح طرق لقياس زمن التخزين وعامل الفقد الشحني في الجهاز الخطي نوع CCD المكون من 256 خلية حساسة للضوء، ويضم هذا اللاقط أربعة خطوط تأخير ضمن الشريحة المتكاملة، وهي معدة لتنفيذ عمليات المسح، والنقل وبعض تطبيقات معالجة الإشارة. إن مادة البحث المستخدمة في الاختبار هي اللاقط الضوئي الخطي نوع CCD 256Pixels، المصمم والمصنع في قسم هندسة أنصاف النواقل، والإلكترونيات الدقيقة في الجامعة التقنية - صوفيا لأهداف البحث العلمي، وهو عبارة عن بنية شاملة متعددة التطبيقات، والوظائف، صممت لتعمل ضمن مجالين واسعين من مجالات الهندسة الإلكترونية، وهما مجال معالجة الإشارة Signal Processing، ومجال اللواقط الضوئية للتصوير Image Photosensing.

Subject Keyword: CCD

Subject terms: Linear CCD, Image sensors, Signal processing.

*مدرس متفرغ في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

Technological Control of a Linear Charged Coupled Device (CCD)

Dr. Faek Arraj*

(Accepted 7/12/2006)

□ ABSTRACT □

This paper describes results of measurements of some specific parameters of Charge Coupled Devices (CCD). Our approach of quality control of CCD is demonstrated. The operation of CCD as a tool for technological test is discussed. The parameters carrier lifetime, storage time and surface states density are easily measured during the technological control by using CCD.

The material of this paper is a quality selection of a universal linear CCD, designed and fabricated in the Department of KTPPME at Technical University – Sofia for scientific research goals.

Keywords: CCD, Linear CCD, Image sensors, Signal processing.

* Assistant Professor, Department of Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

إن الأجهزة ذات العناصر المترابطة بالشحنة CCD من العبارة Charge Coupled Devices، هي أجهزة فريدة من نوعها، وذلك من حيث بنيتها التكنولوجية المتطورة وتطبيقاتها العملية الواسعة، فقد لاقت هذه الأجهزة خلال العقود الثلاثة الماضية انتشاراً واسعاً في مجال اللواظ الضوئية Photo sensor والذاكر Memory ومعالجة الإشارة Signal Processing [2،1].

تستخدم هذه الأجهزة في الوقت الحاضر بشكل رئيسي في بناء اللواظ الضوئية المستخدمة في حساسات التصوير.

في كل مجال من مجالات استخدام الأجهزة CCD توجد بارامترات ديناميكية خاصة، فضلاً عن البارامترات العامة للبنية التكنولوجية والتي تتدرج ضمن البارامترات الساكنة للدارات المتكاملة نوع MOS. من أهم البارامترات الديناميكية (الخاصة بعمل ال CCD في مجال اللواظ الضوئية) هي زمن التخزين Storage Time وعامل الفقد الشحني (ϵ) Charge Transfer Inefficiency [4،3،1].

إن قياس مثل هذه البارامترات يعطي فكرة جيدة عن تردد العمل الأعظمي الذي يمكن أن تعمل عنده البنية، وعن المجال الديناميكي للبنية ويحدد الشحنة الأعظمية التي يمكن تخزينها داخل الحفرة الكمونية، ويعطي فكرة جيدة عن مستوى الضجيج المرافق لعمل هذه الأجهزة فضلاً عن مردود النقل الشحني (η) Charge Transfer Efficiency.

أهمية البحث وأهدافه:

إن أهمية البحث وأهدافه تتجلى من خلال التطبيقات الهامة للأجهزة CCD وخاصة في مجال اللواظ الضوئية للتصوير ومعالجة الصور، وأيضاً في تطبيقات مجال معالجة الإشارات التشابيهية والرقمية في نظم الاتصالات الحديثة [5].

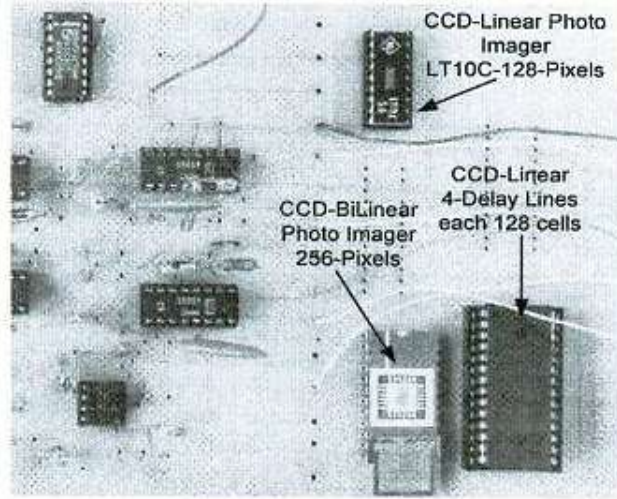
إن شرائح ال CCD قيد الاختبار ماعدا الشريحة LT 10C صممت وصنعت في مصنع أنصاف النواقل في مدينة بوتيف غراد في بلغاريا لأهداف البحث العلمي.

1- البنية التكنولوجية الداخلية للاقط الضوئي CCD 256:

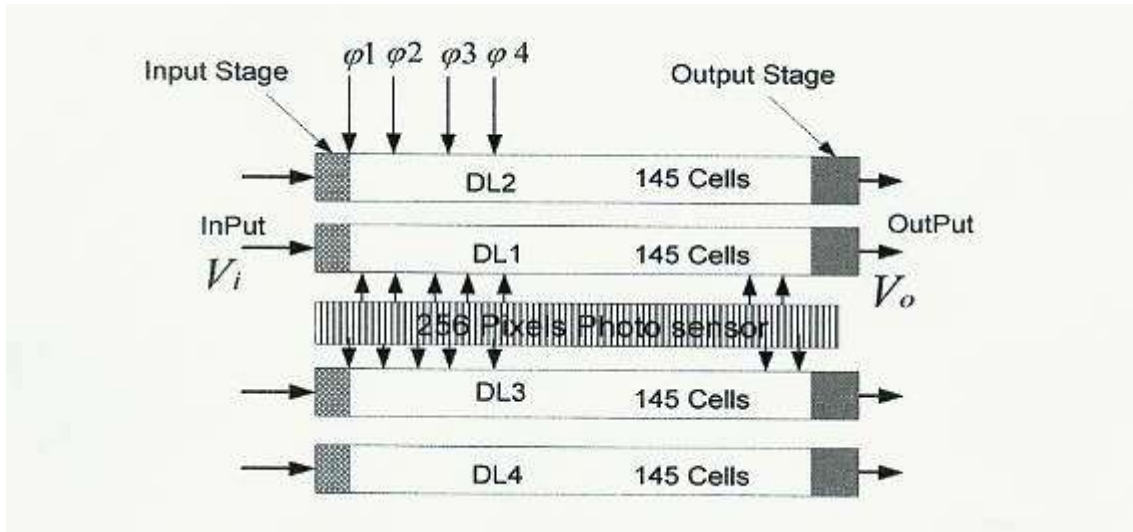
إن مادة البحث المستخدمة في الاختبار هي اللاقط الضوئي الخطي نوع CCD مكون من 256 عنصر حساس للضوء المشار إليه في الصورة رقم (1)، وهي عبارة عن بنية شامة متعددة التطبيقات والوظائف، صممت لتعمل ضمن مجالين واسعين من مجالات الهندسة الإلكترونية وهما مجال معالجة الإشارة ومجال اللواظ الضوئية للتصوير، فهي تحتوي على نوعين من بنى ال CCD وهي صف من العناصر الحساسة للضوء ومجموعة من خطوط تأخير Delay Lines كما هو مبين في المخطط الصندوقي في الشكل (1).

قسم التصوير يتكون من اللاقط الخطي ويتألف من 256 عنصر حساس للضوء (عنصر صورة) نوع MOS، فضلاً عن 8 خلايا حساسة للضوء موجودة في بداية ونهاية قسم التصوير.

قسم المسح يتكون من مجموعة من خطوط تأخير وعددها 4 خطوط تأخير، اثنان منها واقعة على يسار خط اللاقط الضوئي وهما (DL1) و (DL2) والأخران على يمين خط اللاقط الضوئي وهما (DL3) و (DL4). كل خط تأخير يحتوي على 145 خلية تأخير ومجهز بمرحلة دخل ومرحلة خرج مستقلة.



الصورة (1)- مجموعة دارات متكاملة نوع CCD قيد الاختبار.



الشكل(1)-الدارة المتكاملة CCD 256Pixel والمخطط الصندوقي الداخلي للاقط الضوئي.

1- قياس بارامترات الجهاز CCD:

2- قياس زمن التخزين:

زمن التخزين (T_s) بالتعريف هو الزمن اللازم لحدوث حالة التوازن التام في الشحنات الساكنة في منطقة النزوح للحفرة الكمونية من خلال عمليات التوليد الحراري لحاملات الشحنة الثانوية للبنية. وهو يحدد تردد العمل والمجال الديناميكي ودرجة الحرارة الأعظمية لعمل البنية. يعطى زمن التخزين بالعلاقة الآتية [1]:

$$T_S = \frac{q \cdot N_A \cdot d_d}{j_g} = \frac{Q_{P \max}}{J_g}, \quad (1)$$

حيث أن:

d_d : عرض منطقة النزوح أو عمق الحفرة الكمونية.

N_A : تركيز الذرات الآخذة في نصف الناقل المكون للبنية.

J_g : كثافة حاملات الشحن الثانوية الناتجة عن عمليات التوليد الحراري داخل الحفرة الكمونية، وتعطى حسب

العلاقة الآتية:

$$J_g = q \cdot G \cdot d_d, \quad (2)$$

حيث أن:

G : معدل التوليد الحراري، ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$G = \frac{n_i}{2 \cdot \tau_o}, \quad (3)$$

حيث أن:

n_i : التركيز النقي لنصف الناقل المكون لطبقة الأساس للبنية.

τ_o : هو زمن حياة حاملات الشحن وبحسب بالعلاقة الآتية:

$$\tau_o = \frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot V_{th} \cdot N_{SS} \cdot K \cdot T}, \quad (4)$$

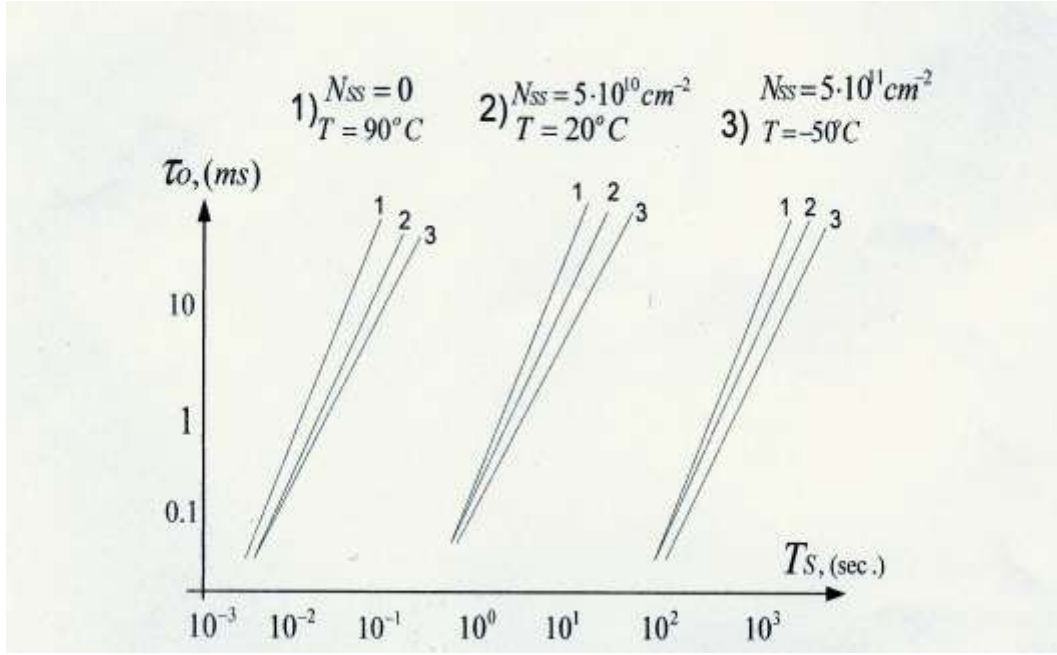
بالتعويض في العلاقة (1) نجد أن زمن التخزين يتعلق مباشرة بزمن حياة حاملات الشحن (τ_o) وبكثافة الحالات

السطحية (N_{SS}) حسب العلاقة التالية:

$$T_S = \frac{q \cdot N_A \cdot d_d}{j_g} = \frac{N_A}{G} = 2 \frac{N_A \cdot \tau_o}{n_i}, \quad (5)$$

الشكل (2) يبين علاقة زمن التخزين T_S بزمن حياة حاملات الشحن τ_o وبكثافة الحالات السطحية N_{SS} عند

درجات حرارة مختلفة.



الشكل (2) - العلاقة بين زمن التخزين T_S وزمن حياة حاملات الشحن τ_o وكثافة الحالات السطحية N_{SS} عند درجات حرارة مختلفة.

يلاحظ من الشكل (2) أنه عند درجات الحرارة العالية ينخفض زمن التخزين بشكل كبير، وبانخفاض درجة الحرارة يزداد زمن التخزين، ويصبح ضمن المجال (100 ÷ 1000) ثانية عند حرارة بحدود ($-50^\circ C$).

تتطلب بني ال CCD اختبار تكنولوجي دوري لقياس زمن حياة حاملات الشحن، والذي بدوره يعطي فكرة جيدة عن أزمنة التزيم للبنية، والتي تمكننا من تحديد وقياس كثير من بارامتراتنا.

يمكن تحديد كل من زمن حياة حاملات الشحن وزمن التخزين للبنى CCD من خلال خواص الشحنة - الزمن لمكثفة ال MOS المكونة للبنية. وفي حالة البنية المؤلفة من عدد كبير من مكثفات ال MOS في مثل هذه الحالة نحتاج إلى قطار من النبضات من أجل قياس الخواص الديناميكية المذكورة للجهاز CCD.

يمكن قياس زمن التخزين (T_S) وزمن حياة حاملات الشحن بطريقة بسيطة تتمثل بتحديد كمية الشحنة الأعظمية (Q_{Pmax}) التي يمكن تخزينها داخل الحفرة الكمونية، وهذا يعتمد على عمق الحفرة الكمونية المتشكلة تحت الأقطاب، أي على قيمة الجهد الأعظمي المطبق على الأقطاب وعلى قيمة الجهد الأعظمي المقاس في خرج البنية (V_{Omax}) والذي يعبر عن قيمة الشحنة الأعظمية التي يمكن تخزينها في الحفرة الكمونية بعد الأخذ بالحسبان مفايد الشحنة ومستوى الضجيج المرافق للبنية في أثناء العمل.

لإجراء هذا الاختبار نستخدم نبضات ساعة ذات تردد عمل صغير نسبياً (f_P) تطبق على أقطاب التحكم والقيادة للبنية، على أن يترك الدخل بدون تطبيق أية إشارة، في هذه الحالة يتم قياس كمية الشحنة المولدة في الحفرة الكمونية مباشرة على الخرج من خلال قياس قيمة جهد الخرج (V_{OP})، وتكون هي الشحنة الناتجة عن عمليات التوليد الحراري داخل البنية، حيث إنه بعد مرور زمن معين سوف تتراكم هذه الشحنات مشكلة جهد صغير في الخرج.

تقاس كمية الشحنة على الخرج (Q_{OP}) خلال فترة زمنية محددة تساوي لفترة عمل نبضات الساعة الاختبارية (دور قطار نبضات الساعة) ($T_P = (1/f_P)$). في هذه الحالة يمكن تحديد كمية الشحنة في الخرج وفق العلاقة الآتية:

$$Q_{OP} = J_g \cdot T_P = \frac{J_g}{f_P} = V_{OP} \cdot C_O \quad (6)$$

حيث أن:

C_O : سعة عقدة مرحلة الخرج للبنية.

V_{OP} : الجهد المقاس في خرج البنية.

يمكن استنتاج زمن التخزين حسب طريقة القياس المتبعة والمشروحة أعلاه وفق العلاقة الآتية:

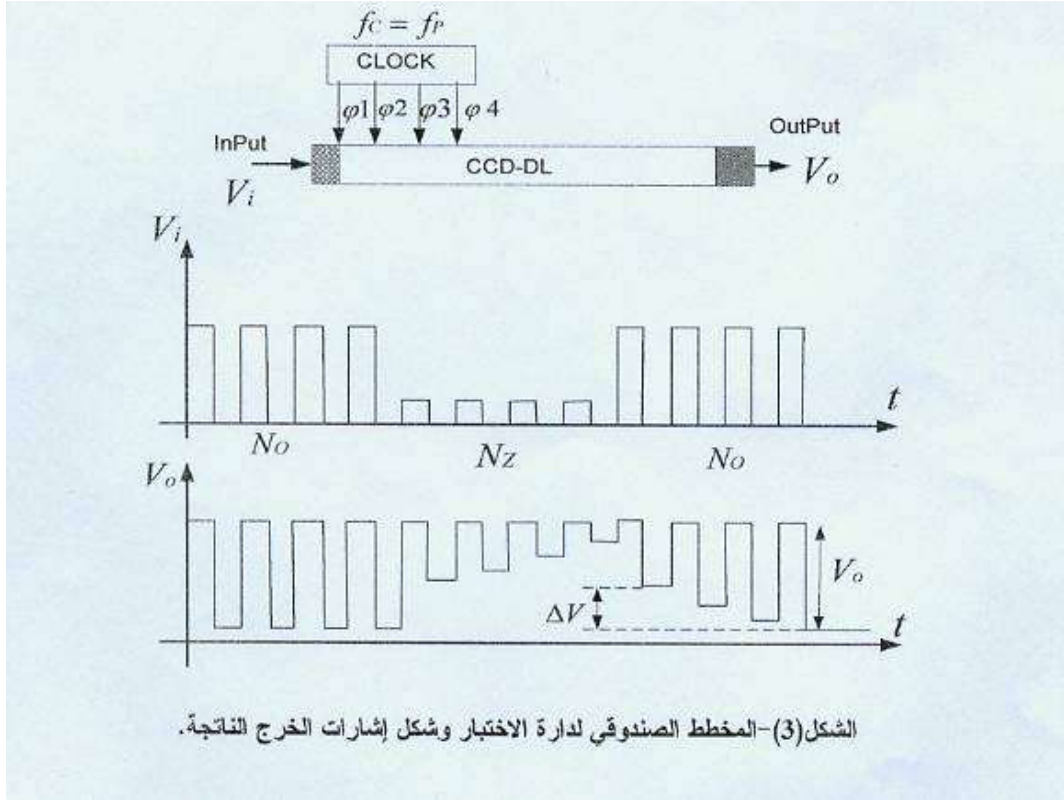
$$T_S = T_P \frac{V_{Omax}}{V_{OP}} \quad (7)$$

2- قياس عامل الفقد الشحني:

إن عامل الفقد الشحني هو ببساطة تعبير عن كمية الفقد في الشحنة خلال عملية انتقال واحدة للشحنة ضمن قناة النقل ويرمز له بالرمز (ϵ)، ومنه يمكن تحديد مردود النقل الشحني [2,1].

بقياس عامل الفقد الشحني يمكننا بسهولة تحديد كثافة الحالات السطحية (N_{SS}) في نصف الناقل والتي تعمل كمصائد للشحنة Charge Capture عند عبورها قناة النقل. يمكن تحديد كثافة الحالات السطحية من خلال قياس الخواص فولت-فاراد C-V لمكثفة ال MOS، إنما في حالتنا هذه وبوجود عدد كبير من مكثفات ال MOS في بنية ال CCD يصبح من الصعب قياس هذه الخواص.

لقياس عامل الفقد الشحني يجب قياس وتحديد كمية الشحنة الأعظمية التي يمكن تخزينها في الحفرة الكمونية (Q_{max}) من خلال قياس قيمة الجهد الأعظمي في خرج البنية، ومقدار الفقد في الشحنة خلال انتقال واحد ضمن قناة النقل (ΔQ_i)، إنما في حالتنا هذه وبوجود n عملية انتقال يجب إيجاد مجموع المفاقيد في الشحنة في n خلية ($\sum \Delta Q_i$) ولذلك تتم عملية القياس بتطبيق قطار من نبضات الساعة يحتوي على سلسلة من الأصفار (Zero) نرسم لها بالرمز (N_Z)، تليها سلسلة من الواحدات (Ones) نرسم لها بالرمز (N_O)، فعند ورود الأصفار تكون الحفرة الكمونية فارغة، وعند ورود الواحدات تصبح مليئة بالشحنة، وبالنظر إلى جهد الخرج وقياسه بواسطة راسم الإشارة يمكن مراقبة التشوه الحاصل في الإشارة ويمكن تقييم الفقد في الجهد، بالتالي يمكن بسهولة تقييم وحساب الفقد الشحني خلال البنية المكونة من n خلية كما هو مبين في الشكل (3).



يمكن حساب عامل فقد الشحني حسب التعريف أعلاه كما يلي:

$$\varepsilon = \frac{\sum \Delta Q_i}{Q_{\max}}, \quad (8)$$

حيث أن:

Q_i : هي كمية الشحنة المتواجدة في الخلية رقم (i).

Q_{\max} : هي كمية الشحنة الأعظمية التي يمكن تخزينها في الخلية الواحدة.

يمكن حساب عدد الحالات السطحية في واحدة الحجم أو ما يسمى بكثافة الحالات السطحية (N_{SS}) من خلال

العلاقة بين عامل فقد الشحني والكثافة [1] كما يأتي:

$$\varepsilon = \frac{q \cdot K \cdot T \cdot N_{SS}}{C_i \cdot \Delta V_{\phi s}} \ln(3 + 4N_Z), \quad (9)$$

حيث أن:

C_i : هي سعة الأوكسيد لمكثفة ال MOS.

$\Delta V_{\phi s}$: هو فرق الكمون السطحي للحفرة الكمونية.

3- الانتخاب النوعي للأجهزة CCD الخطية:

الطريقة المقترحة في هذا البحث للانتخاب النوعي لجهاز CCD شامل يسمح للشريحة المتكاملة أن تكون معدة لنوعين رئيسيين من التطبيقات:

1- تطبيقات التصوير.

2- تطبيقات التأخير الزمني.

من أجل العمل الطبيعي لجهاز CCD كلاقط ضوئي خطي من الضروري جميع خطوط التأخير والعناصر الحساسة للضوء أن تعمل بدون أي خلل. وعادة تكون هذه الخطوط مع القسم الحساس للضوء موجودة على الشريحة نفسها ومغلفة بغلاف مصنوع من السيراميك بحامل يحتوي على 24 رجل بتنظيم خطي مزدوج 24-Pin DIP بنافذة مغطاة بزجاج شفاف مصنوع من الكوارتز للسماح للأشعة الضوئية بالنفوذ إلى قسم التصوير كما هو مبين في الصورة رقم (1).

الشرائح المنتخبة الخاصة بتطبيقات التأخير الزمني وضعت ضمن مجموعات جزئية حسب عدد الخطوط المستخدمة كما هو مبين في الجدول (1)، كما يأتي:

الجدول (1)-الانتخاب النوعي لجهاز CCD خطي.

Group		Sensing Chip	DL1	DL2	DL3	DL4
A		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
No		No	Yes	Yes	Yes	Yes
D	D1	No	Yes	Yes	No	No
		No	No	No	Yes	Yes
	D2	No	No	Yes	No	Yes
		No	Yes	No	Yes	No
C		No	Yes	Yes	Yes	No
		No	No	Yes	Yes	Yes
		No	Yes	No	Yes	Yes
		No	Yes	Yes	No	Yes

المجموعة A تستخدم جميع خطوط التأخير الأربعة الموجودة على الشريحة، وتسمح هذه المجموعة بتصميم مجموعة من خطوط التأخير بالوصل التفرعي، أو التسلسلي، أو المختلط بهدف الحصول على أزمنة تأخير مختلفة وتحسين بعض البارامترات مثل المجال الديناميكي والمناعة ضد الضجيج.

المجموعة No لا تستخدم خطوط تأخير، في هذه المجموعة يعمل فقط قسم التصوير بدون تطبيق إشارة على الدخل ويجب أن تكون الشريحة موجودة في الظلام الحالك، في هذه الحالة يتم قياس جهد الخرج الضجيجي الناتج عن الحرارة.

المجموعة C تستخدم ثلاثة خطوط تأخير فقط.

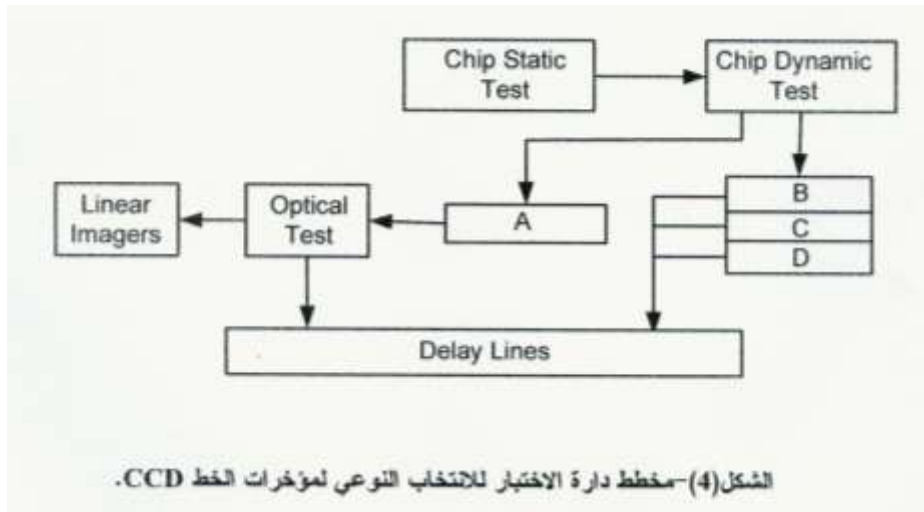
المجموعة D تستخدم مؤخري خط فقط من خطوط التأخير الأربعة، ويمكن أن تكون منتمية إلى الجهة نفس اليمينية أم اليسارية لقسم التصوير، أو أن تكون منتمية إلى الجهتين.

4-مجموعة الاختبارات ونتائج القياس:

الاختبارات الكهربائية الديناميكية للبنية المتوفرة لدينا حالياً تبدأ باختبار عمل خطوط التأخير الأربعة الموجودة على الشريحة كل على حدة، وتؤخذ نتائج القياس لجميع البارامترات.

أجهزة القياس المستخدمة بسيطة ومنوارة في مخابر الجامعات مثل مولد للنبضات متغير المطال والتردد فضلاً عن راسم الإشارة بقناتين وتحتاج البنية CCD إلى نبضات تحكم وقيادة لعمل مجموعة خطوط التأخير.

يبين الشكل (4) المخطط الصندوقي لدارة الاختبار لعمل جميع خطوط التأخير الموجودة ضمن الشريحة وفق المجموعات لموضحة أعلاه.



الجدول (2) يبين شروط القياس الأولية ونتائج الاختبارات المنفذة على البنية المتكاملة 256-Pixels CCD .

الجدول (2) نتائج الاختبارات المنفذة على البنية CCD 256 خلية.

المعطيات الأولية	
تركيز الشوائب الآخذة في طبقة الأساس	$N_a = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
سماكة طبقة الأوكسيد	$d_i = 0.085 \mu\text{m}$
فرق الكمون التماسي	$\Delta \phi_s = 0.8 \text{ v}$
عدد نبضات الأصفار	$N_z = 8$
درجة حرارة المحيط	$T_a = 20^\circ \text{ C}$
دور نبضات الساعة الطبيعي	$T_t = 10 \mu\text{s}$
دور نبضات الاختبار	$t_P = 1 \text{ ms}$
نتائج الاختبار Experimental Results	
جهد الخرج الأعظمي	$V_{o \text{ max}} = 1,5 \text{ v}$
جهد الخرج عند اللحظة الزمنية ($t = t_P$)	$V_{op} = 0.08 \text{ v}$
عامل الفقد الشحني بعد ($N_z = 8$)	$\epsilon_1 = 8 \cdot 10^{-3}$
زمن التخزين من أجل ($t = t_P$)	$T_s = 20 \text{ ms}$
كثافة الحالات السطحية	$N_{ss} = 2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$
زمن حياة حاملات الشحن	$\tau_o = 0.08 \mu\text{s}$

الخاتمة والمناقشة:

إن طرق الاختبار المقترحة في هذا البحث لقياس وتحديد بارامترات أزمنة التأخير، وزمن حياة حاملات الشحن، وكثافة الحالات السطحية، وعامل فقد الشحني لبنى ال CCD تتصف بالدقة، والبساطة، والسهولة، والسرعة في إجراء القياسات المخبرية بمعدات، وأجهزة قياس بسيطة متوافرة في معظم مخابر الجامعات، ولا تحتاج إلى أجهزة اختبار معقدة. وقد تمت عمليات الاختبار في مخبر المنطقية والدارات المتكاملة في قسم هندسة الاتصالات والإلكترونيات في جامعة تشرين خلال العامين الماضيين 2005-2006.

المراجع:

1. HOWES, M. J. & MORGAN, D. V., *Charge Coupled Devices and Systems*, JOHN WILEY & SONS, New York, 2001.
2. SEQUIN, C. H. & TOMPSETT, M. F., *Charge Transfer Devices*, Academic Press, New York, 1999.
3. PELGROM, M. A. & HEIJNS, H., *A CCD Delay Line for Video Applications*, IEEE Trans. Cons. Electronics, Vol. CE-33, No. 4, November, 2003.
4. SATO, M. et al., *A CMOS CCD Video Delay Line*, ISSCC 1984, pp. 120-121, 1998.
5. RABINER, L. B. & GOLD, B., *Theory and Application of Digital Signal Processing*, Prentice Hall, 2002.