



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Όνομα : Κάραλης Νικόλας
A/M: 09104042

Ολογραφικές Μνήμες

Η θεωρία και οι εφαρμογές τους.

Μάθημα : Φυσική III
Καθηγητής : Κατσούφης Ηλίας

Ιανουάριος 2006

Εισαγωγή

Καθώς το πλήθος και το μέγεθος των δεδομένων που παράγονται καθημερινά και τα οποία θέλουμε να αποθηκεύσουμε αυξάνονται με αλματώδεις ρυθμούς, γίνεται αναγκαία η εξεύρεση νέων αποθηκευτικών μέσων και μεθόδων.

Η αρχή έγινε με τη χρήση μαγνητικών και μηχανικών μέσων όπως οι κασέτες και οι σκληροί δίσκοι. Οι αυξανόμενες ανάγκες μας, οδήγησαν στην χρήση οπτικών μέσων, όπως τα CD, DVD και πρόσφατα τα Blu-Ray Discs. Την αιχμή του δόρατος αυτή τη στιγμή στην έρευνα νέων μέσων αποθήκευσης αποτελούν οι ολογραφικές μνήμες. Μια τεχνολογία που πρωτοξεκίνησε πριν από τέσσερις δεκαετίες, τώρα πια βρίσκεται λίγο πριν την δημιουργία των πρώτων εμπορικών προϊόντων.

Οι ολογραφική μνήμη είναι μια τεχνολογία η οποία χρησιμοποιεί τρισδιάστατα μέσα για την αποθήκευση των πληροφοριών και γράφει σελίδες δεδομένων (οι οποίες περιέχουν εκατομμύρια bit) αντί να τα γράφει διαδοχικά, γεγονός που αυξάνει την χωρητικότητα καθώς και την ταχύτητα προσπέλασης. Για να επιτευχθούν τα παραπάνω χρησιμοποιούνται φωτοευαίσθητα κρυσταλλικά υλικά και φωτοπολυμερή, πάνω στα οποία αποθηκεύονται τα δεδομένα ως μοτίβα, με τη χρήση δύο ακτινών laser (παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στα CD-ROM). Οι ακτίνες προκαλούν φυσικές ή χημικές μεταβολές στο υλικό, και η πληροφορία αποθηκεύεται ως μεταβολές στη διαθλαστική ικανότητα, την ικανότητα απορρόφησης του φωτός ή το πάχος του φωτοευαίσθητου υλικού.

Για την ανάγνωση των δεδομένων χρησιμοποιείται η αντίστροφη πορεία. Φωτίζοντας με μια από τις δύο ακτίνες το υλικό, αυτό ανακλά το φως με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγει την άλλη ακτίνα που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική παραγωγή του μοτίβου. Έπειτα με τη χρήση ενός ειδικού κυκλώματος κάμερας, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται στις ψηφιακές βιντεοκάμερες (charged-couple device camera – CCD camera), γίνεται δυνατή η ανάγνωση των αρχικών δεδομένων και η μετάφραση τους.

Για να αυξηθεί η χωρητικότητα, οι ερευνητές έχουν καταφέρει να γράψουν πολλές σελίδες δεδομένων, πάνω στο ίδιο τμήμα του υλικού χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη κύματος στις ακτίνες laser ή διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ακτίνας στο υλικό.

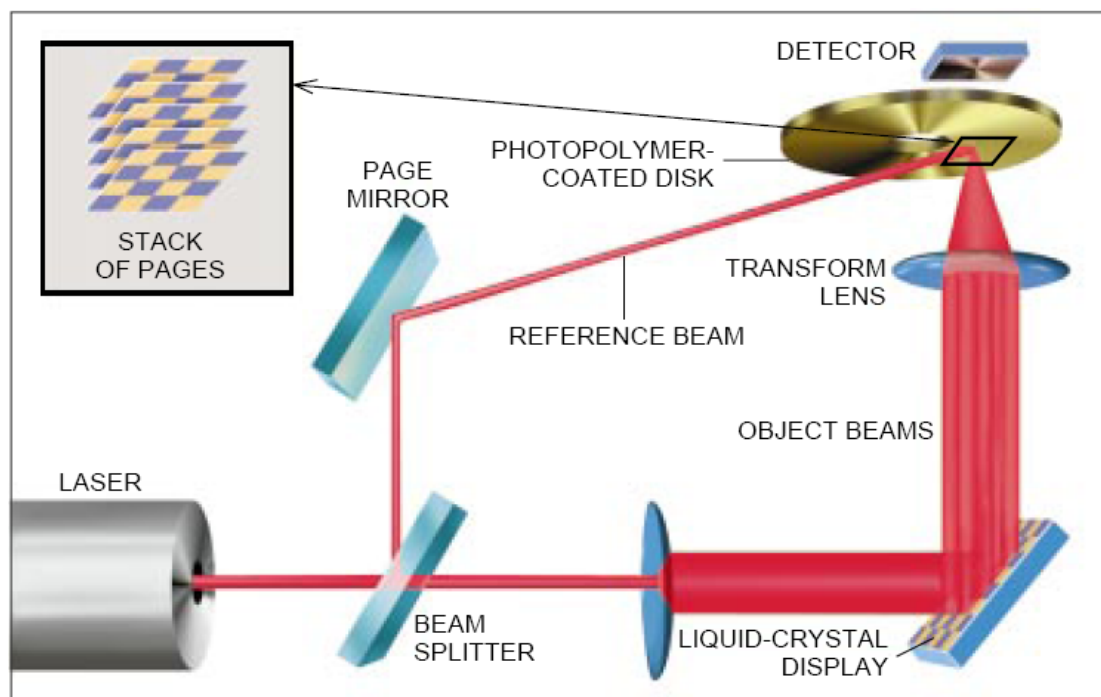
Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα μοτίβα που αποτελούν τα δεδομένα πάνω στο υλικό, έχουν τη κυματοειδή μορφή και διαχέονται σε όλο τον όγκο του υλικού, κάνει τις ολογραφικές μνήμες μια ασφαλή μέθοδο αποθήκευσης, καθώς πρέπει να συμβεί μεγάλη καταστροφή του υλικού για να καταστραφούν τα δεδομένα (data redundancy).

Πλεονεκτήματα

- Μεγάλη χωρητικότητα ($\cong 500 \frac{Mbit}{cm^2}$)
- Μεγάλη ταχύτητα διαμεταγωγής δεδομένων ($\cong 5 \frac{GB}{sec}$)
- Μικρός χρόνος προσπέλασης ($\cong 5ms$)
- Δυνατότητα εγγραφής πολλών δεδομένων πάνω στο ίδιο τμήμα του υλικού, με χρήση διαφορετικής γωνίας της ακτίνας
- Δυνατότητα αποθήκευσης και ανάκτησης ολόκληρων σελίδων δεδομένων ταυτόχρονα.
- Πολύ λίγα κινούμενα μηχανικά μέρη.
- Προστασία δεδομένων από καταστροφή.

Μειονεκτήματα

- Είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο και δεν υπάρχουν εμπορικά προϊόντα.
- Είναι δύσκολο να βρεθούν κρυσταλλικά υλικά που να συνδυάζουν τις απαιτούμενες ιδιότητες (μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης, μεγάλη ταχύτητα και χαμηλό κόστος).
- Δεν είναι εύκολο να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στην ανάγνωση και εγγραφή των δεδομένων.
- Δυσκολία ευθυγράμμισης των ακτινών laser και ρύθμισης της γωνίας τους.



Αρχή λειτουργίας των ολογραφικών μνημών

Ένα σύστημα ολογραφικής αποθήκευσης δεδομένων αποτελείται από ένα μέσο αποθήκευσης, από σύστημα οπτικής καταγραφής και ένα πλέγμα φωτοανιχνευτών. Μια ακτίνα φωτός (blue-green argon laser) διαχωρίζεται σε μια ακτίνα αναφοράς (reference beam) και σε μια ακτίνα σήματος (ή ακτίνα αντικειμένου) (object/signal beam) οι οποίες χρησιμοποιούνται για να εγγράψουν το ολόγραμμα στο μέσο. Το μέσο εγγραφής είναι συνήθως ένας φωτοδιαθλαστικός κρύσταλλος όπως το LiNbO_3 και το BaTiO_3 που έχει συγκεκριμένα οπτικά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι μεγάλη περιθλαστική αποτελεσματικότητα, υψηλή ανάλυση, μόνιμη αποθήκευση (με δυνατότητα διαγραφής) και γρήγορη διαγραφή με την εφαρμογή εξωτερικής διέγερσης, όπως υπεριώδεις φως.

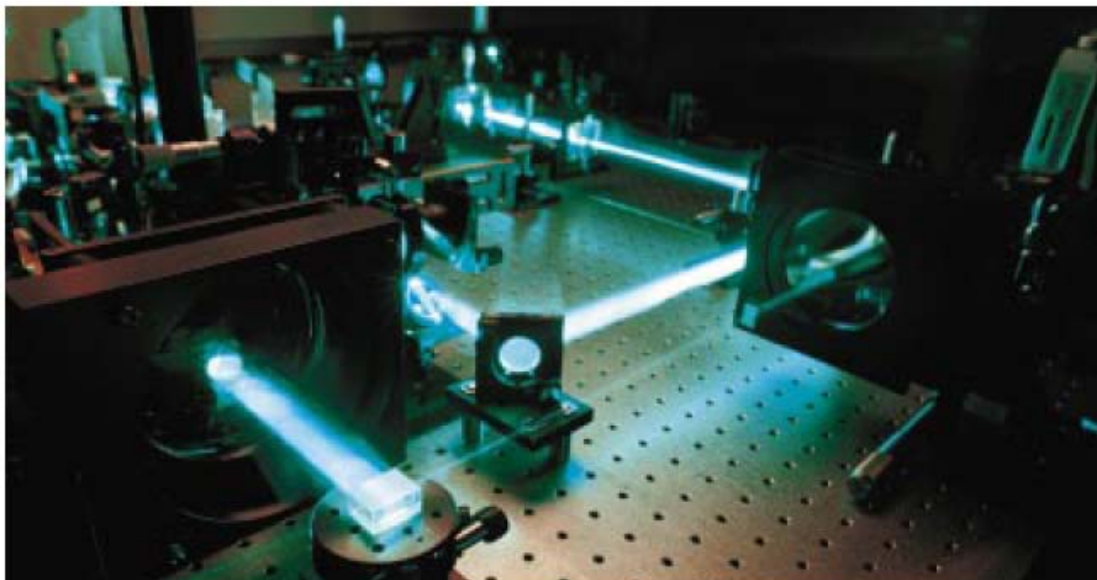
Για να μεταδοθεί η πληροφορία μέσω της ακτίνας αντικειμένου, χρησιμοποιείται μια διάταξη που ονομάζεται Spatial Light Modulator (SLM). Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια οθόνη υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display - LCD), η οποία ως γνωστόν αποτελείται από ένα πίνακα με εικονοστοιχεία. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να βρίσκονται σε δύο διακριτές καταστάσεις (ανοιχτό - σβηστό) οι οποίες αντιστοιχούν στα δυαδικά ψηφία (binary units - bits) 1 και 0. Ένας υπολογιστής μεταφέρει τα δεδομένα στην οθόνη υγρών κρυστάλλων. Το αποτέλεσμα είναι ένας πίνακας από φωτισμένες και σκοτεινές περιοχές. Όταν η ακτίνα laser που καλούμε ακτίνα αντικειμένου περάσει μέσα από τη διάταξη SLM τροποποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελείται και αυτή από σκοτεινές και φωτεινές περιοχές.

Το ολόγραμμα δεν είναι τίποτα άλλο παρά το τρισδιάστατο μοτίβο παρεμβολής (interference pattern) της τομής της ακτίνας αναφοράς και της ακτίνας αντικειμένου όταν βρίσκονται σε γωνία 90° μεταξύ τους. Αυτό το μοτίβο παρεμβολής εντυπώνεται στον κρύσταλλο σαν περιοχές θετικής και αρνητικής φόρτισης.

Για να ανακτηθεί το αποθηκευμένο ολόγραμμα χρησιμοποιείται μια ακτίνα φωτός με το ίδιο μήκος κύματος και γωνία πρόσπτωσης όπως και η ακτίνα αναφοράς, η οποία στέλνεται στον κρύσταλλο και το παραγόμενο περιθλαστικό μοτίβο χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή του μοτίβου της ακτίνας αντικειμένου. Πολλά διαφορετικά ολογράμματα μπορούν να αποθηκευτούν στον ίδιο κρύσταλλο, αλλάζοντας την γωνία πρόσπτωσης ή το μήκος κύματος της ακτίνας αναφοράς.

Ένα χαρακτηριστικό που μειώνει την αξία της ολογραφικής αποθήκευσης είναι το γεγονός ότι κάθε φορά που η ακτίνα αναφοράς διαβάζει τον κρύσταλλο, το αποθηκευμένο ολόγραμμα τροποποιείται ελαφρώς, γεγονός που μειώνει την ακεραιότητα των δεδομένων.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται υλικά όπως LiNbO_3 ενισχυμένο με άτομα Fe και Tb (ενώ γίνεται και χρήση ακτινών UV για την ενεργοποίηση των ατόμων Tb) τα οποία μπορούν να διαφυλάξουν το αποθηκευμένο ολόγραμμα για περίπου 2 χρόνια χωρίς σημαντική φθορά.



Η πιο κοινή διάταξη ολογραφικής αποθήκευσης αποτελείται από ένα φως laser, ένα διαχωριστή ακτινών (beam splitter) ο οποίος χωρίζει την ακτίνα σε ακτίνα αναφοράς και σε ακτίνα αντικειμένου, διάφοροι φακοί και καθρέφτες που χρησιμοποιούνται για την ανακατεύθυνση του φωτός, ένας φωτοδιαθλαστικός κρύσταλλος και ένα πλέγμα φωτοανιχνευτών γύρω από τον κρύσταλλο για να ανιχνεύσουν το ολόγραμμα.

Για να εγγραφεί το ολόγραμμα, ένας καθρέφτης χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει την ακτίνα φωτός σε ακτίνα αναφοράς και ακτίνα αντικειμένου. Η ακτίνα αντικειμένου αλληλεπιδρά με ένα αντικείμενο και το φως που ανακλάται από το αντικείμενο τέμνει την ακτίνα αναφοράς σε συγκεκριμένες γωνίες. Το αποτέλεσμα είναι ένα μοτίβο παρεμβολής περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την ανακατασκευή της εικόνας του αντικειμένου έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία.

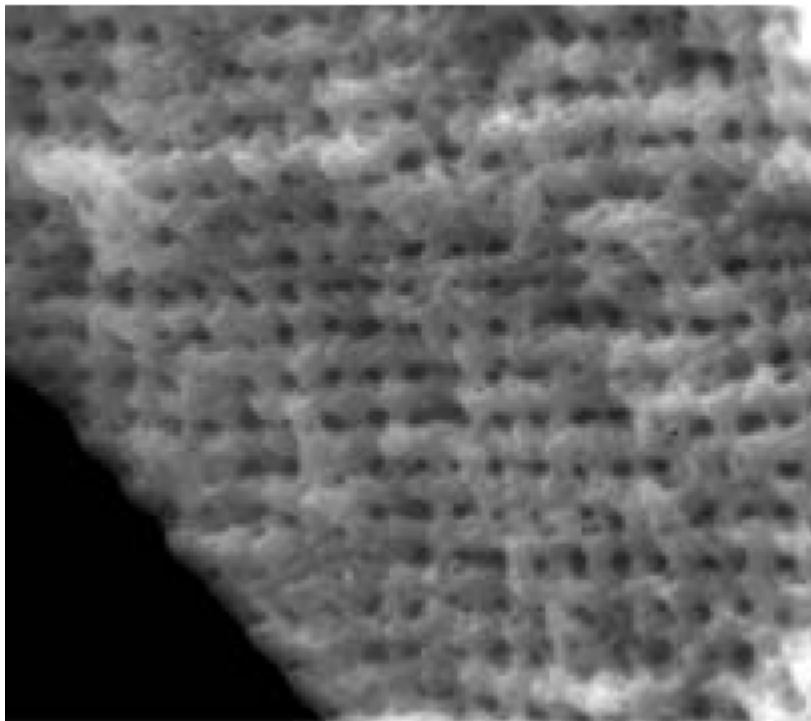
Το μοτίβο παρεμβολής εγγράφεται στο φωτοδιαθλαστικό υλικό και μπορεί να ανακτηθεί αργότερα κάνοντας χρήση μιας ακτίνας που είναι ίδια με την ακτίνα αναφοράς. Αυτό είναι δυνατόν γιατί το ολόγραμμα έχει την ιδιότητα ότι αν φωτιστεί με μια από τις δύο ακτίνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εγγραφή του, το φως περιθλάται κατά τη διεύθυνση της δεύτερης ακτίνας και έτσι όταν φωτιστεί με την ακτίνα αναφοράς δημιουργείται η ανακλώμενη αρχική εικόνα. Η ανακλώμενη εικόνα πρέπει να μετασχηματιστεί σε μια κανονική ακτίνα με χρήση καθρεπτών και φακών.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές ολογραφικές τεχνικές που ερευνώνται. Οι περισσότερα υποσχόμενες από αυτές είναι οι τεχνικές γωνιακής πολυπλεξίας (angle multiplexing), πολυπλεξίας μήκους κύματος (wave-length multiplexing), και η φασματική ολογραφία.

Οι πρώτες δύο μοιάζουν μεταξύ τους, με μόνη διαφορά τον τρόπο εγγραφής και ανάκτησης των δεδομένων, που βασίζονται σε διαφορετικές γωνίες και διαφορετικά μήκη κύματος αντίστοιχα. Στη μέθοδο της γωνιακής πολυπλεξίας, ακόμα και μια μικρή διαφορά μεταξύ των γωνιών της χρησιμοποιούμενης ακτίνας και της ακτίνας αναφοράς, της τάξης των 10^{-3} mm μπορεί να προκαλέσει αποτυχία της ανάκτησης των δεδομένων.

Η φασματική ολογραφία συνδυάζει τις βασικές αρχές των προηγούμενων μεθόδων χρησιμοποιώντας ένα πλάνο χρονικής διαδοχής για να τοποθετήσει τα ολογράμματα το καθένα σε δικό του κομμάτι του όγκου του κρυστάλλου, χρησιμοποιώντας τις συγκρούσεις μεταξύ των υψίσυχνων παλμών laser για να διαφοροποιήσει την εικόνα από την καθυστερημένη ακτίνα αναφοράς.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται για μέσα ολογραφικής αποθήκευσης. Αυτά είναι οι φωτοδιαθλαστικοί κρύσταλλοι και τα φωτοπολυμερή (οργανικά films). Οι πιο κοινοί φωτοδιαθλαστικοί κρύσταλλοι είναι οι LiNbO_3 και BaTiO_3 .

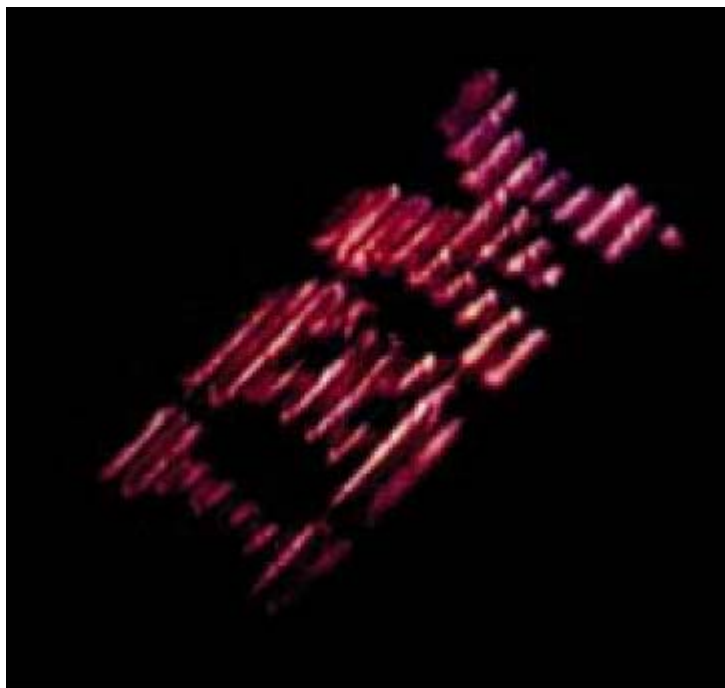


Τρισδιάστατο πλέγμα σταγονιδίων υγρών κρυστάλλων, σχηματίζουν ένα φωτονικό κρύσταλλο του οποίου οι ιδιότητες μπορούν να ελεγχθούν εφαρμόζοντας τάση. Οι τρύπες απέχουν 0.25 micron .

Κατά τη διάρκεια της ολογραφικής εγγραφής, η διαθλαστική ικανότητα των σημείων του κρυστάλλου αλλάζει εξαιτίας της μετακίνησης φορτίων ηλεκτρονίων. Καθώς περισσότερα ολογράμματα γράφονται σε έναν κρύσταλλο η μεγαλύτερη φθορά των δεδομένων συμβαίνει εξαιτίας της παρεμβολής των εγγεγραμμένων ολογραμμάτων.

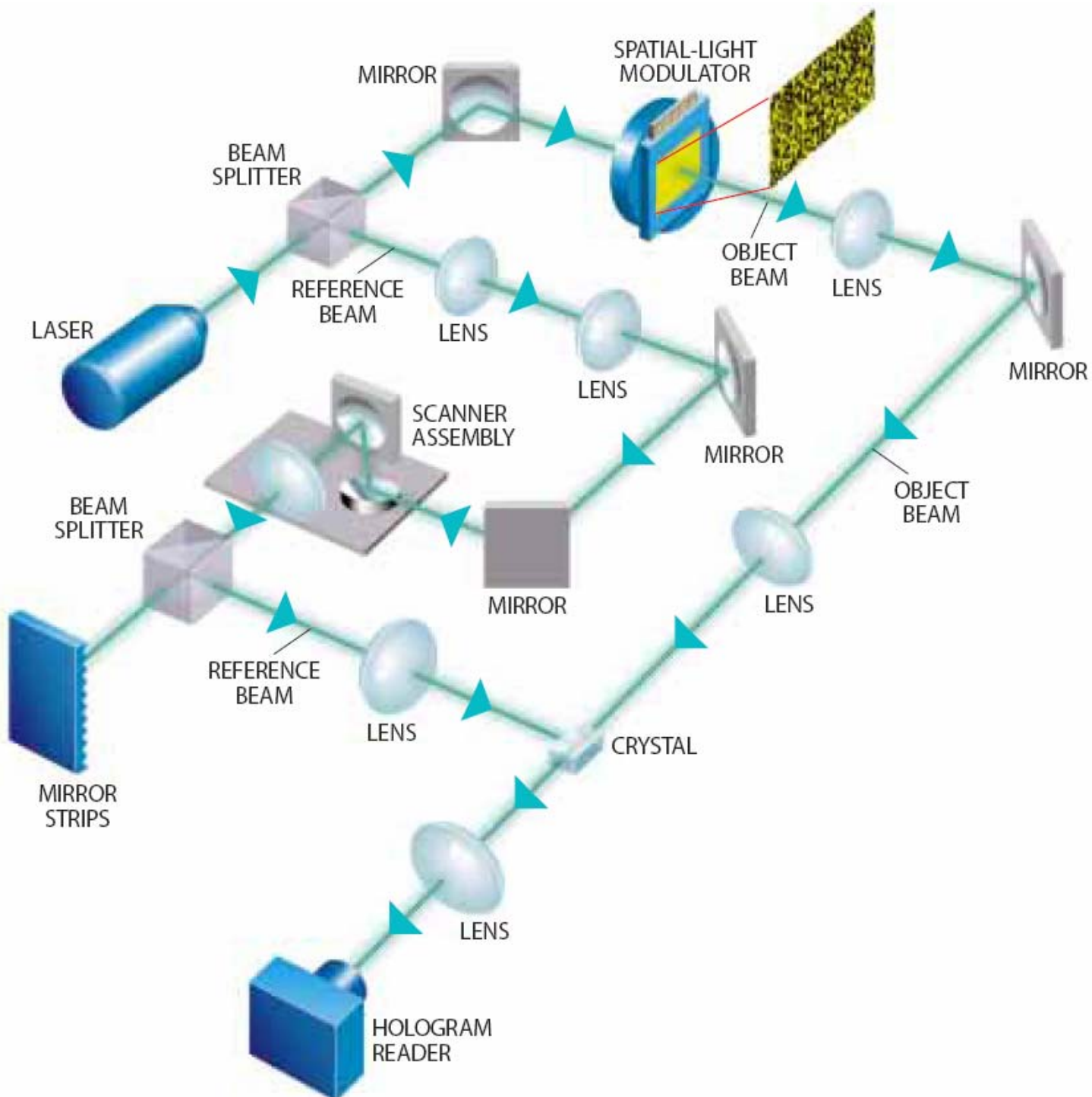
Επιπλέον, κάθε φορά που το ολόγραμμα διαβάζεται, μειώνεται η ακεραιότητα των δεδομένων του καθώς η ακτίνα αναφοράς αλλάζει την διαθλαστική φύση του κρυστάλλου στην συγκεκριμένη περιοχή που διαβάζει.

Οι φωτοδιαθλαστικοί κρύσταλλοι είναι κατάλληλοι για χρήση σαν μνήμη τυχαίας προσπέλασης (random access memory – RAM) με περιοδική ανανέωση των δεδομένων και μπορούν να διαγραφούν και να επανεγγραφούν πολλές φορές. Επιπλέον έχουν αναπτυχθεί φωτοπολυμερή που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μέσα ολογραφικής αποθήκευσης. Τυπικά, η πυκνότητα των φωτοπολυμερών είναι πολύ μικρότερη αυτής των φωτοδιαθλαστικών κρυστάλλων, καθώς τα φωτοπολυμερή περιορίζονται από την μηχανική σταθερότητα και την οπτική ποιότητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φωτοπολυμερούς είναι το Dypont HRF-150. Αυτό το film έχει $12\text{bits} / \text{mm}^2$ με πυκνότητα 100 mm. Αυτή η πυκνότητα είναι διπλάσια αυτής του DVD-ROM. Όταν γράφεται ένα ολόγραμμα, το μοτίβο παρεμβολής εντυπώνεται στο φωτοπολυμερές καθώς προκαλούνται φωτοχημικές αλλαγές στο film. Η διαμόρφωση του μητρώου διάθλασης αλλάζει αλλάζοντας την πυκνότητα των εκτεθειμένων περιοχών του film. Τα αποθηκευμένα ολογράμματα είναι μόνιμα και δεν υποβαθμίζονται με το χρόνο ή την ανάγνωση τους. Το γεγονός αυτό κάνει τα φωτοπολυμερή κατάλληλα για μνήμη αποκλειστικής ανάγνωση (read-only memory-ROM).



Ολόγραμμα που παρήχθη στα εργαστήρια της IBM με το λογότυπο της εταιρίας.

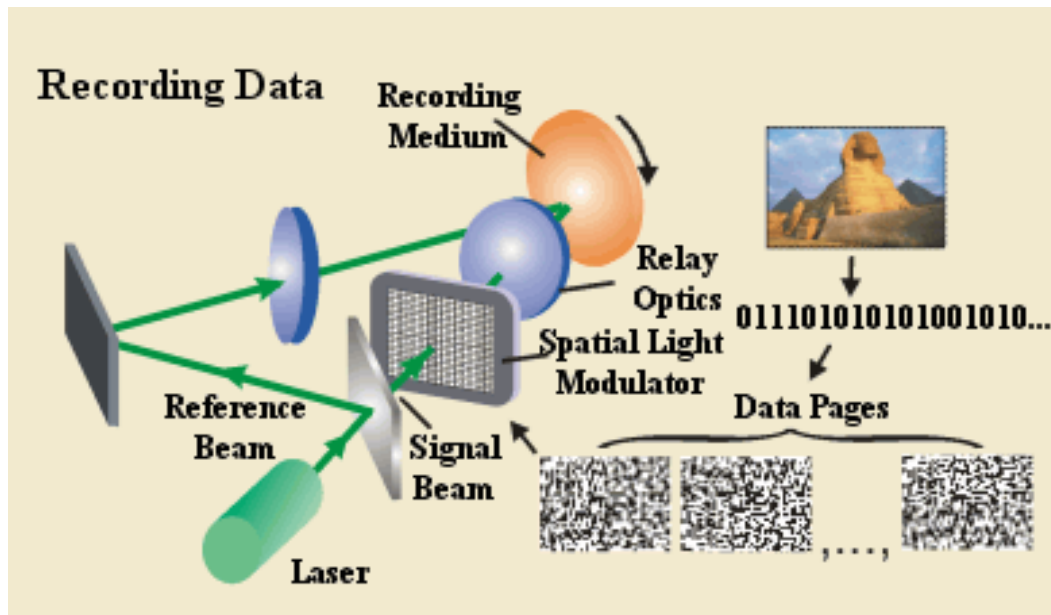
Διάταξη Ολογραφικής Αποθήκευσης



Λειτουργία της Ολογραφικής Αποθήκευσης

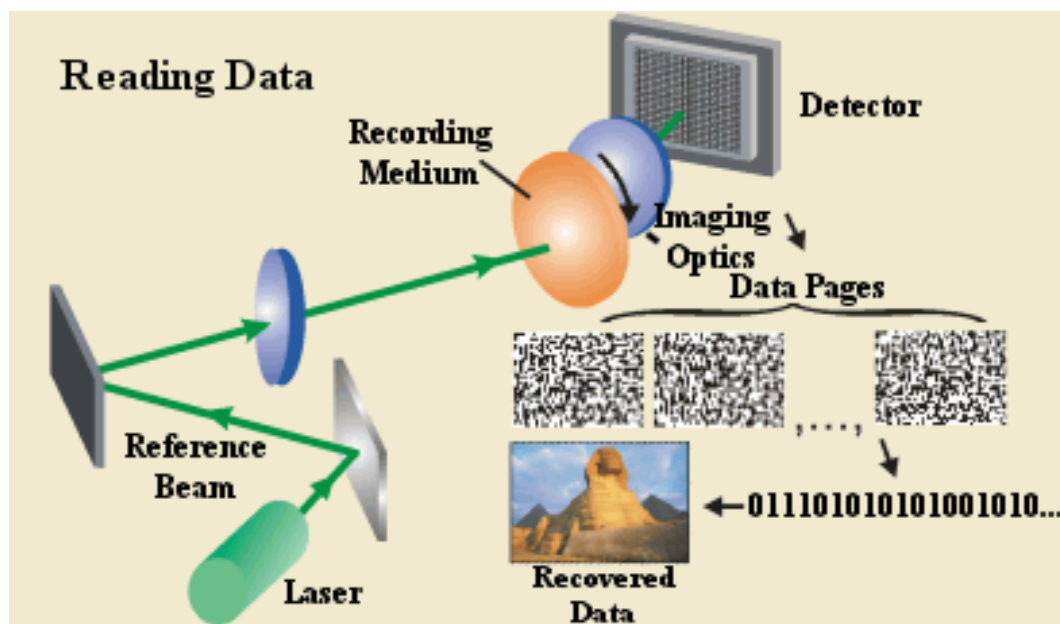
Εγγραφή

- 1) Μία συσκευή laser εκπέμπει μια ακτίνα
- 2) Η ακτίνα διαχωρίζεται στις ακτίνες αντικειμένου και αναφοράς
- 3) Η ακτίνα αντικειμένου διέρχεται από τη διάταξη SLM και η πληροφορία εντυπώνεται σε αυτήν.
- 4) Η ακτίνα αντικειμένου μαζί με την ακτίνα αναφοράς, αφού ανακλαστούν πολλές φορές και περάσουν από φακούς, διέρχονται μέσα από τον κρύσταλλο κάθετα μεταξύ τους και οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε αυτόν.



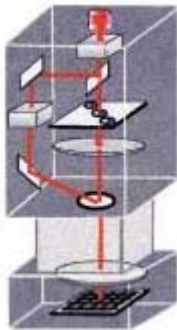
Ανάγνωση

- 1) Εκπέμπεται μια ακτίνα laser ίδιου μήκους κύματος με την ακτίνα αναφοράς.
- 2) Η ακτίνα προσπίπτει στον κρύσταλλο με ακριβώς την ίδια γωνία με την οποία προσπίπτει η ακτίνα αναφοράς κατά την εγγραφή.
- 3) Η ακτίνα περιθλάται από τον κρύσταλλο περιέχοντας την εγγεγραμμένη πληροφορία.
- 4) Η ακτίνα προσπίπτει στην CCD camera η οποία προσλαμβάνει την ακτίνα, μεταφράζει τα δεδομένα και τα αποστέλλει σε έναν υπολογιστή.



Εφαρμογές

Η ολογραφική αποθήκευση αποτελεί μια από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων. Οι δυνατότητες εφαρμογής της είναι διευρυμένες χάρη στις μεγάλες χωρητικότητες και τις μεγάλες ταχύτητες που μπορούν να επιτευχθούν. Μια από τις βασικότερες εφαρμογές, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα αποτελεί η χρήση της για την αντικατάσταση των DVD. Σε αυτό βοηθάει το γεγονός ότι η χωρητικότητα των νέων μέσων είναι έως και 200 φορές μεγαλύτερη αυτής του DVD και είναι δεκάδες φορές ταχύτερα. Τα πρώτα εμπορικά προϊόντα αυτού το είδους αναμένεται να διατεθούν στο τέλος του 2006, σύμφωνα με ανακοινώσεις της εταιρίας In Phase. Επιπλέον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τα ενίσχυση των συστημάτων μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM) αφού ένα υβρίδιο μνήμης πυριτίου και φωτοδιαθλαστικών κρυστάλλων θα συνδυάζε την ταχύτητα με τη μεγάλη χωρητικότητα. Τέλος, είναι σημαντική η εφαρμογή της ολογραφική αποθήκευσης στα συστήματα βάσεων δεδομένων όπου μπορούν να επιτευχθούν κολοσσιαίες χωρητικότητες. Αυτές, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα γρήγορης αναζήτησης και ταυτοποίησης που παρέχουν οι ολογραφικές μνήμες, μπορεί να αποτελέσει στοιχείο που θα αλλάξει τη δομή των μελλοντικών συστημάτων βάσεων δεδομένων.



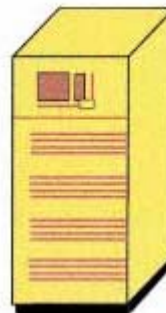
Extended DRAM
Χωρητικότητα: 25GB
Χρόνος Προσπέλασης : 10 ns



CD-ROM type
Χωρητικότητα: 1 TB
Χρόνος Προσπέλασης : 10 ms



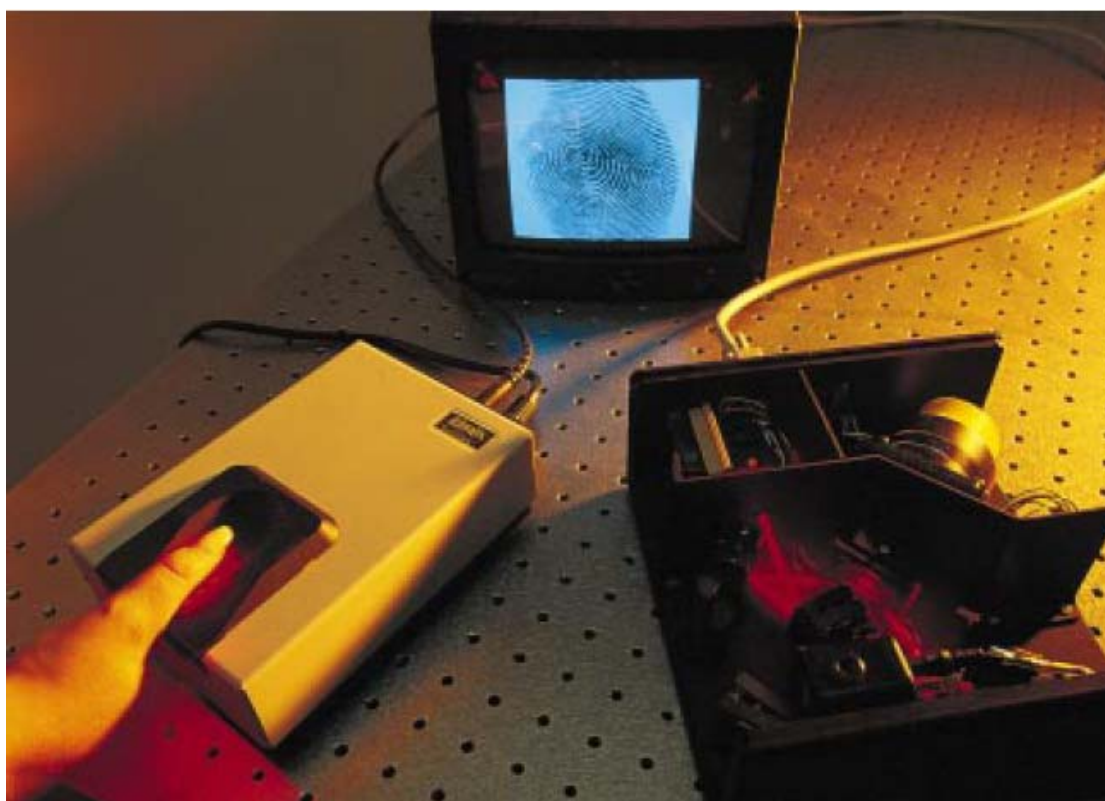
Hard Disc Drive (DASD)
Χωρητικότητα: 1 TB
Χρόνος Προσπέλασης : 10 ms



Rack mounted archive
Χωρητικότητα: 1 PB
Χρόνος Προσπέλασης : 1 s

Φυσικά οι δυνατότητες εφαρμογής της ολογραφικής αποθήκευσης δεν εξαντλούνται εδώ.

Η νέα αυτή μέθοδος θεωρείται θεμελιώδης για την περαιτέρω ανάπτυξη των Υπέρ-Υπολογιστών (hyper computers), των Πλεγμάτων Υπολογιστών (Grid Computing) καθώς και των Οπτικών Υπολογιστών (Optical Computing). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ερευνητικό Πείραμα Atlas του CERN, το οποίο θα ξεκινήσει το 2007 στα πλαίσια του LHC (Large Hadron Collider). Η επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος αυτού βασίζεται στο LCG (LHC Computing Grid) ένα πλέγμα υπολογιστών από όλο τον κόσμο. Το πείραμα Atlas θα παράγει περίπου ένα CD δεδομένων το δευτερόλεπτο. Είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς το πόσο χρήσιμη θα ήταν η δυνατότητα ολογραφικής αποθήκευσης σε τέτοιες περιπτώσεις.



Ένα πειραματικό σύστημα ανάγνωσης δαχτυλικών αποτυπωμάτων, με χρήση ολογραφικής αποθήκευσης των στοιχείων.

Τέλος, μια πολύ σημαντική και ενδιαφέρουσα εφαρμογή της ολογραφικής αποθήκευσης, αποτελεί η χρήση πρωτεϊνών όπως η bacteriorhodopsin αντί για φωτοδιαθλαστικούς κρυστάλλους, κάτι που οδηγεί το σύστημα μειωμένες ενεργειακές ανάγκες και αυξάνει την ταχύτητα και το χρόνο ζωής του αποθηκευτικού μέσου. Αυτή είναι και μια από τις εφαρμογές της οπτικής αποθήκευσης στους Υπολογιστές Πρωτεϊνών (Protein based Computing).

Βιβλιογραφία

- Demetri Psaltis and Fai Mok, **Holographic Memories**, Scientific American, November 1995
- Jon William Toigo, **Avoiding a Data Crunch**, Scientific American, May 2000
- News Scan - **Holographic Control**, Scientific American, July 2003
- Philip Yam, **Plastics, Benjamin. . .**, Scientific American, June 1993
- Tim Beardsley, **The Dope on Holography**, Scientific American, September 1998
- W. Wayt Gibbs, **Ready or Not**, Scientific American, October 1994
- <http://www.inphase-technologies.com>
- J. Ashley, M.-P. Bernal, G. W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, B. Marcus, R. M. Macfarlane, R. M. Shelby, and G. T. Sincerbox , **Holographic data storage**, IBM Journal of Research and Development , Directions in information technology, Vol.44, Number 3, 2000