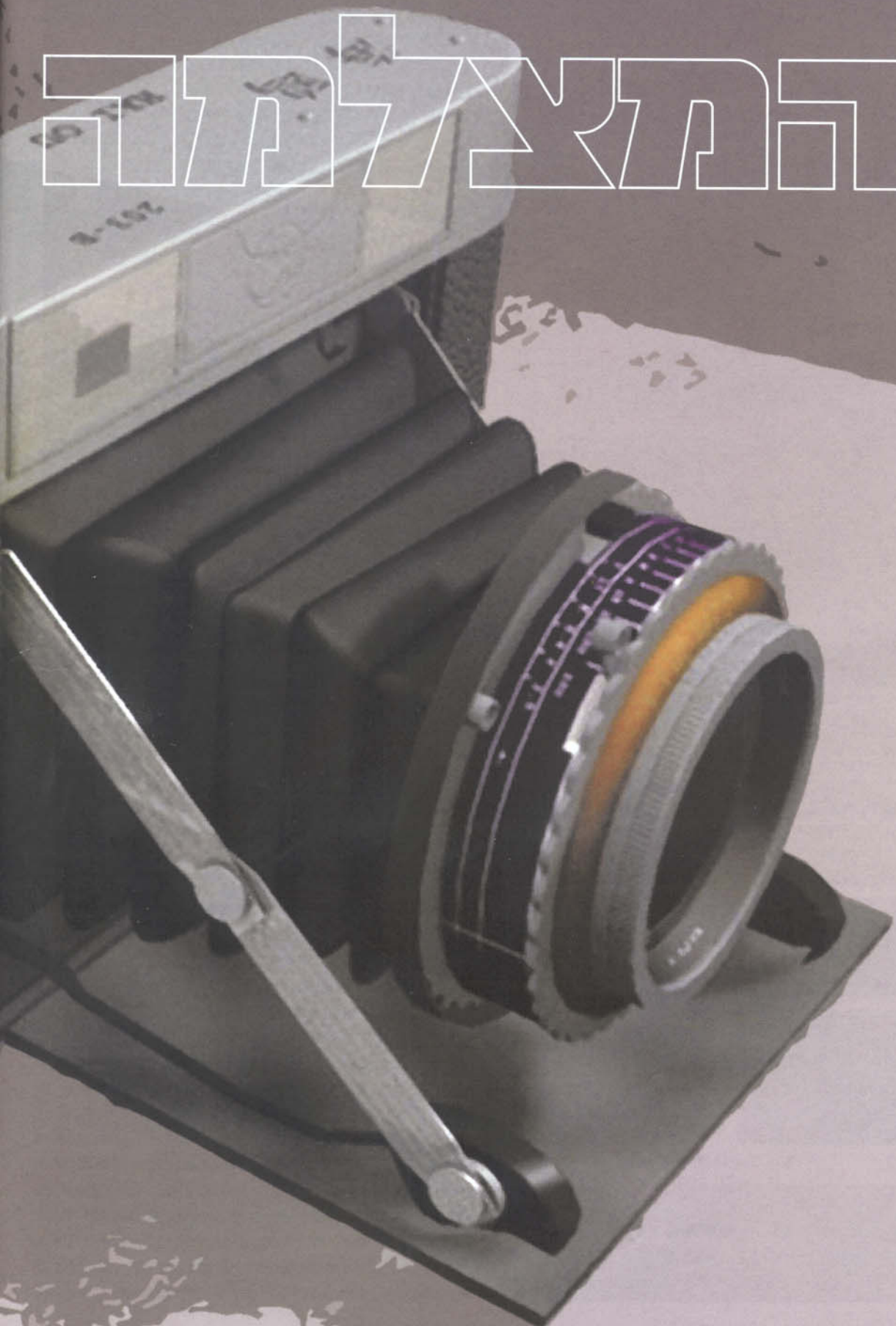


התצורה

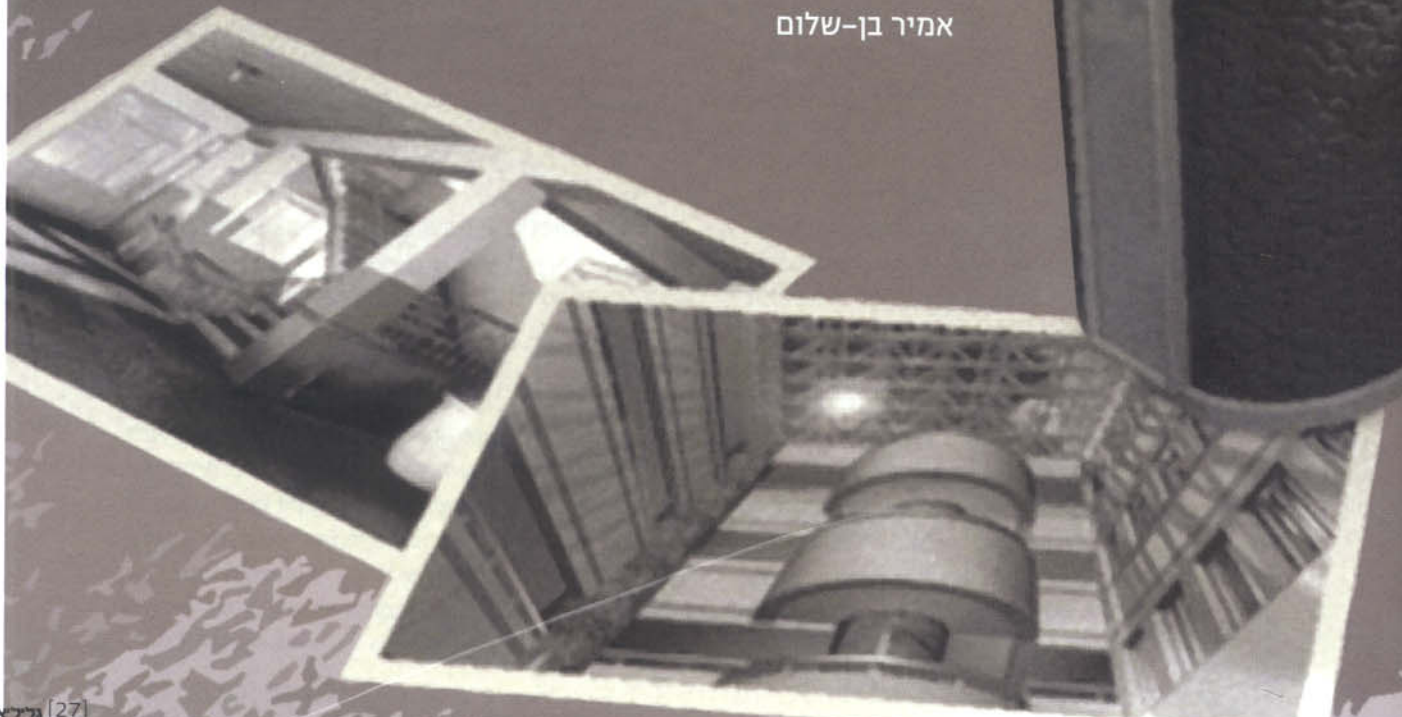


הדיגיטלית

חיקוי טכנולוגי לעין אנושית?

דורות של אבולוציה טכנולוגית ייצרו מערכת מורכבת של מיליוני חיישנים רגישים לאור, בדומה לרשתית העין. הוסיפו לכך את השימוש באופטיקה, המשנה את המיקוד בהתאם למרחק, שלבו את תפקיד הצמצם בוויסות עוצמת האור ואת העובדה כי המערכת מסוגלת לאמוד את המרחק אל העצם בו היא מתבוננת, והרי לכם התפתחות המצלמה כשילוב בין עין האדם למוח האנושי

אמיר בן-שלום





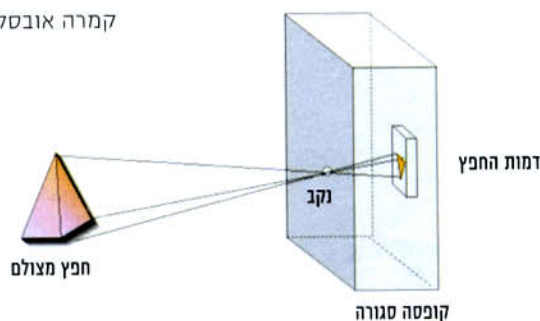
בר לפני למעלה מאלפיים שנה תיאר הפילוסוף היווני אריסטו את העיקרון שבעזרתו ניתן לצפות בבירור בשמש או בליקוי חמה: מחזיקים לוח אטום בו מנוקב חור קטן, ודמות השמש מופיעה בתוך צל הלוח.

בצורה דומה, כאשר מניחים את הלוח מול חפץ או נוף מוארים ומניחים דף מאחוריו נוצרת על הדף דמות החפץ. קרני האור החוזרות מהחפץ לכיוון הלוח נחסמות על ידי, אך חלקן עובר בדיוק דרך הנקב. אותן קרניים ממשיכות בקו ישר ויוצרות על הדף דמות מדויקת והפוכה של החפץ שממנו יצאו.

החל מהמאה ה-15 לערך, השתמשו אמנים בעיקרון זה כדי לצייר תמונות נוף. הבעיה העיקרית היתה, שכדי שהדמות הנוצרת תהיה חדה על החריץ להיות קטן מאוד. נקב קטן העביר מעט אור ויצר דמות כהה שאי אפשר היה להבחין בה כלל על הדף המואר. כדי לראות את הדמות בנו האומנים תיבה ("לשכה") אטומה לאור, וניקבו חריץ קטן באחת הדפנות. מול הדופן הנגדית תלו נייר או בד והעתיקו את הדמות שנוצרה עליו. זו היתה המערכת הראשונה שפותחה לרישום חצי אוטומטי של תמונות, והיא נקראה "הלשכה האפלה", או בלטינית, "קמרה אובסקורה".

השכלול הראשון נעשה במאה ה-16, כאשר הנקב הוחלף בעדשה מרכזת. העדשה הכניסה כמות גדולה של אור ומיקדה אותו, כך שלמרות שהחריץ איפשר כניסה של אור רב, נוצרה תמונה ברורה. חסרון העדשה היה שנוצר צורך לכוון בדיוק את מרחק הנייר ממנה, על-פי מרחק המוקד של העדשה. מרחק זה הגדיר גם את גודל הדמות. כך נולדה העדשה הטלסקופית, שמיקדה את האור במרחק גדול יותר ליצירת דמות גדולה, לעומת העדשה רחבת הזווית, שיצרה דמות קרובה וקטנה יותר.

קמרה אובסקורה



המהפכה הטכנולוגית

השלב הבא היה החלפת נייר הציור בחומר שיוכל לקלוט בעצמו את האור ולקבע עליו את הדמות מבלי שהאמן יאלץ לצייר בעצמו. שלב זה נמשך, למען האמת, עד היום, במעבדות המחקר של החברות המייצרות סרטי צילום. המשימה שעמדה לפני החוקרים דאז היתה כפולה: למצוא חומר שישנה אחת מתכונותיו כתוצאה מפגיעת קרני האור, כלומר שהאזורים בהם פגע האור יהפכו לקשים יותר או ישנו את צבעם, ולמצוא תהליך שיקבע את השינוי שנוצר כך שהדמות ש"צולמה" לא תשתנה עם הזמן. במצלמות הסרט של היום התהליך ברור למדי: חושפים את הסרט לאור המגיע מכיוון העדשה; מתרחשים בו

שינויים כימיים, תהליך הפיתוח הכימי במעבדה גורם לאזורים שנחשפו לאור להיות כהים ולאילו שלא להישאר שקופים. לאחר מכן עובר הסרט תהליך כימי של קיבוע המייצב אותו, שלא ישתנה עוד וכך אנו מקבלים את התשליל, הנגטיב. בצורה דומה יוצרים את התמונה עצמה על נייר צילום, הפועל בדומה סרט.

החל במאה ה-17 ועד סוף המאה ה-19, עסקו מאות כימאים בניסיון למצוא את החומרים והתהליכים הכימיים המתאימים לכך. רשימת הניסיונות כללה כלורידים וניטרטים של כסף, אדי כספית ויוד ושאר חומרים, שאם היו מתגלים על ידי פחחי האו"ם בעיראק היו עלולים להיחשב לחומרי לחימה. גם למטבח היתה תרומה לפיתוח סרט הצילום: בעזרת חלמון ביצה הצמידו לנייר הצילום את מלחי הכסף הרגישים לאור. הגילטין שימש במשך תקופה ארוכה כחומר מקשר לתערובות מלחים אלו.

רק בסוף המאה ה-19 הצליח חובב צילום אמריקאי, ג'ורג' איסטמן, לייצר מצלמה וסרט צילום מסחריים שהשימוש בהם לא דרש השכלה אקדמית באופטיקה ובכימיה, ואת התמונות ניתן היה למסור לפיתוח בחנות מבלי להפוך את חדר האמבטיה או המטבח למעבדה כימית. איסטמן הקים את חברת "קודאק", ותוך פחות מעשור החלה המהפכה הטכנולוגית של הצילום: היכולת לתעד ולרשום את המראות שהעין רואה בצורה מדויקת מבלי להזדקק לאמן ומבלי להיות תלוי בדרך שבה הוא רואה את הדברים, הפכה את הצילום לעיסוק שסחף אליו אלפים רבים של מקצוענים וחובבים בכל העולם.

במהלך המאה הבאה הלכה המצלמה והשתכללה. ממעבדות הפיתוח יצאו סרטי הצילום הצבעוני, סרטים רגישים לאור המאפשרים לצלם במהירות רבה עצמים בתנועה או בתאורה חלשה מאוד וסרטים רגישים לאור תת אדום, המסוגלים לצלם גם חפצים שהעין אינה מסוגלת לראות. במקביל פותחו סרטי צילום שבו מקובעים חומרי הפיתוח והקיבוע (סרטי הפולרואיד) ומצלמות הקולנוע, המסוגלות לצלם במהירות רצף של תמונות בודדות בזו אחר זו, וכאשר מקרינים אותן במהירות גבוהה מספיק, העין אינה יכולה להבחין שמדובר ברצף של תמונות בודדות, ונוצרת אשליית התנועה.

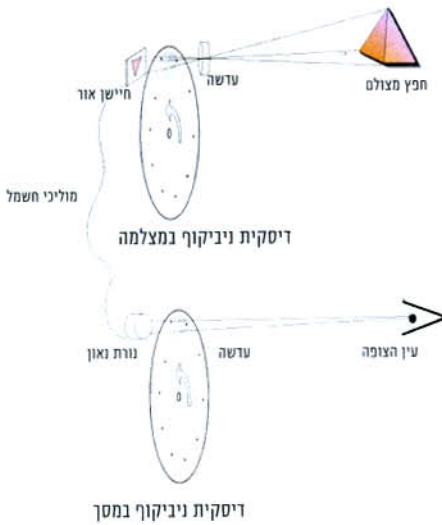
פיתוחים נוספים נעשו גם בתחום האופטיקה: עדשות מסוגים שונים, המאפשרות "לקרב" או "להרחיק" את הדמות המצולמת, מסנני אור ה"צובעים" את התמונה, מטשטשים אותה או יוצרים אפקטים ויזואליים אחרים, מנגנונים המאפשרים לצלם למקד את העדשה בצורה מדויקת, מדי-אור המבטיחים שהסרט יקלוט את כמות האור הרצויה, מבזקים המאפשרים צילום בחושך ועוד.

המצלמה האלקטרונית

למצלמות הסרט, למרות כל השכלולים, היו שני חסרונות מהותיים: נדרש זמן ארוך יחסית מרגע הצילום עד לקבלת התמונה, וכדי להעבירה ממקום למקום היה צורך בשליח. דרישה זו למיידיות, כבר בסוף המאה ה-19, נשמעת במבט ראשון קצת מוגזמת, אך צריך לזכור שבאותה התקופה כבר פעל מכשיר הטלגרף, הומצאו מכשירי הטלפון והמרכזייה האוטומטית, פותחו מיקרופונים ורמקולים הממירים אותות

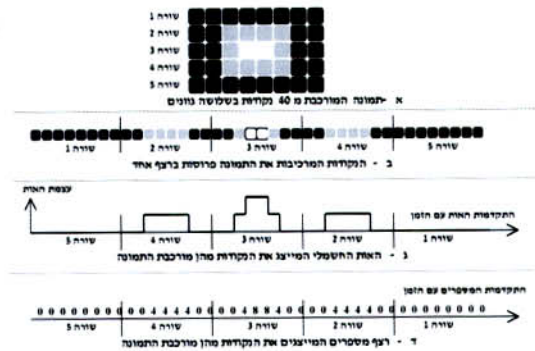
זהה לזו שבמצלמה, והיא הופעלה מזרם שמקורו בתא הסלניום. הנורית היבהבה בהתאם לתמונה המצולמת, וסיבוב הדיסקית הבטיח שהצופה יראה עוצמת אור מתאימה בכל נקודה.

דיסקית ניביקוף



חשמליים לגלי קול, הומצא הפונוגראף, מכשיר ההקלטה הראשון, והחלו שידורי הרדיו הראשונים. מאוד טבעי היה לנסות ולפתח גם דרך לרשום או להעתיק תמונות בעזרת זרם חשמלי ולהעבירן דרך קווי הטלגרף למרחקים.

דרך להפוך קרני אור לאותות חשמליים היתה ידועה כבר מאמצע המאה ה-19 עם גילוי האפקט הפוטו-וולטאי, והחל משנות ה-70 של אותה מאה החלו ממציאים להשתמש בסלניום – חומר שמשנה את התנגדותו החשמלית בהשפעת קרני אור ופועל כחיישן. עם זאת, נותר בעינו הצורך למצוא דרך לתרגם תמונה דו ממדית לרצף מסודר של אותות חשמליים. מאחר שאי אפשר לציין בבת אחת את כל מגוון עוצמות האור בכל הנקודות שבתמונה, יש צורך לחלק את התמונה לנקודות (פיקסלים), לתרגם את עוצמת האור והצבע בכל נקודה לאות חשמלי ולהעבירו בחוטים בסדר מסוים – נקודה אחר נקודה ושורה אחר שורה, במכשיר הקולט ומתרגם את רצף האותות חזרה לעוצמות אור על הצג באותו סדר. זהו עקרון סריקת התמונה המשמש עד היום בכל סורק, מכשיר פקס, צג מחשב או טלוויזיה. בכדי לשמור או להעביר את התמונה במחשב או להעבירה כמידע ספרתי, ניתן להמיר את האותות החשמליים לרצף של מספרים.



"פריסה" של תמונה לסדרת נקודות, אותות חשמליים ומספריים

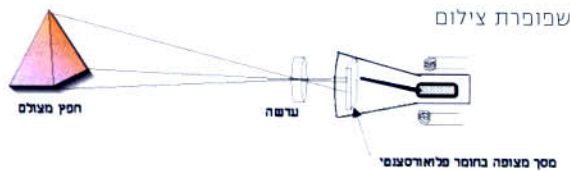
כמענה לבעיה, פותחו במקביל שתי שיטות סריקה: המכנית והאלקטרונית, והן חלק משרשרת ארוכה של המצאות ושיפורים טכנולוגיים שהביאו בסופו של דבר לייצור מסחרי של מצלמות אלקטרוניות ומכשירי טלוויזיה. שיטות הסריקה המכניות התבססו על אלמנטים מסתובבים כמו מראות או עדשות שסרקו את התמונה, אך השיטה המוכרת ביותר היא זו שפיתח סטודנט גרמני בשם ניביקוף בשנות ה-80 של המאה ה-19. המערכת שפיתח התבססה על דיסקית מסתובבת שבה נוקבו סדרת חורים בצורה מדורגת (ראו איור). מול הדיסקית הותקנה עדשת מצלמה, ומאחוריה תא סלניום. כאשר הסתובבה הדיסקית, חשפו החורים את תא הסלניום לתמונה המגיעה מהעדשה נקודה אחר נקודה ושורה אחר שורה. כך פותחה מצלמת הטלוויזיה הראשונה.

ה"צג" של דיסקית ניביקוף פותח רק כ-20 שנה לאחר מכן, עם המצאת נורית הניאון, אשר ניתן היה לווסת במהירות מספקת את עוצמת האור שפלט. נורית הניאון הותקנה מאחורי דיסקית

השיטות האלקטרוניות התבססו על הזנת קרן אלקטרוניים בעזרת שדה חשמלי או מגנטי. שיטות אלו מורכבות יותר, משום שדרשו שאיבת אוויר ויצירת ריק, כדי לאפשר את תנועת האלקטרוניים. הסריקה האלקטרונית היתה מהירה מהמכנית, והמהירות איפשרה סריקת מספר רב יותר של שורות בכל תמונה ושיפור האיכות, כמו גם סריקה של למעלה מעשרים תמונות בשנייה, כך שניתן היה לצלם ולשדר חפצים בתנועה.

תחילתה של הסריקה האלקטרונית היתה דווקא בצג ההקרנה: שופרת הקרן הקתודית (CRT – Cathode Ray Tube) הומצאה כבר בשנות ה-90 של המאה ה-19, ועד היום משמשת במרבית מסכי הטלוויזיה והמחשב בעולם. מדובר בצג העשוי חומר פלואורוסצנטי, שבו פוגעים אלקטרוניים הנפלטים מ"תחת אלקטרוניים". תותח האלקטרוניים בנוי מחומר המחומם עד לטמפרטורה שבה הוא משחרר אלקטרוניים (זוהי הקתודה), שעל שמה נקראת השופרת) ומאלקטרודות המאיצות את האלקטרוניים לכיוון הצג. האלקטרוניים הפוגעים בצג גורמים לעירור ולפליטת אור.

את תנועת קרן האלקטרוניים ניתן לכוון על ידי שדה חשמלי או מגנטי, ובעזרת לוחות או סלילים היוצרים שדות אלו, מכוונים את תנועת הקרן כך שתסרוק את הצג שורה אחר שורה. תוך כדי הסריקה מווסתים את עוצמת הקרן ו"מאירים" כל



עד שנות השבעים של המאה ה-20 פעלו כל מצלמות הטלוויזיה בעזרת שפופרת סריקה, טכנולוגיה מיושנת שהפכה לצוואר בקבוק שהפריע למזער את המצלמות ולהקטין את



האיקונוסקופ של ולדימיר זורקין

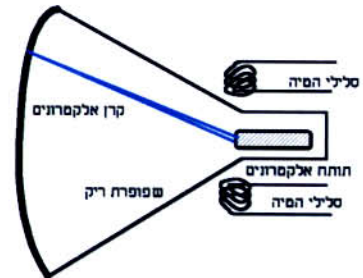
צריכת הזרם שלהן. שאר המעגלים האלקטרוניים עברו משפופרות ריק גדולות לטרנזיסטורים קטנים, ומהם למעגלים משולבים זעירים. שפופרת הסריקה, למרות שהצטמקה עם הזמן, עדיין היתה עשויה צינור זכוכית

(כדי לשמור על הריק) וצרכה הספק ניכר כדי לחמם את הקתודה שתפלוט אלקטרונים. בעיה דומה קיימת גם במכשיר הטלוויזיה הרגיל, שבו שפופרת הצג צורכת את מרבית ההספק ושוקלת למעלה מ-70% ממשקלה הכולל של הטלוויזיה.

התקן ה-CCD, שהחליף את שפופרת הסריקה, פותח בסוף שנות ה-60 במעבדות בל ונועד במקור להיות התקן זיכרון אשר יתחרה בזיכרונות הבועה המגנטיים שפותחו גם הם באותה התקופה. מכיוון שזיכרונות הסיליקון הדיגיטליים ניצחו לבסוף את כל השאר, נטשה חברת בל את התקן ה-CCD, אך חברת סוני זיהתה את הפוטנציאל של ההתקן בתחום הצילום והחלה לפתח את מצלמות הטלוויזיה הראשונות שהתבססו על התקן זה.

השם CCD הוא ראשי תיבות של הטכנולוגיה Charge Coupled Device, כלומר "התקן צימוד מטענים". מדובר במטריצה של חיישני אור זעירים המיוצרים על גבי פיסת סיליקון, בטכנולוגיה דומה מאוד לזו המשמשת לייצור מעגלים משולבים הנמצאים כיום בכל מכשיר אלקטרוני. חיישנים אלו ממירים את האור הפוגע בהם למטען חשמלי ומעבירים אותו הצידה מחיישן לחיישן. על פעולת החיישנים והזאת המטען שולטים בעזרת אותות חשמליים. בשלב הראשון מומר האור הפוגע בחיישנים למטען חשמלי. מטען זה נאגר בצמוד לחיישן במקום שמכונה על-ידי הפיזיקאים "בור פוטנציאל", ומהנדסי האלקטרוניקה קוראים לו קבל או אלמנט קיבולי. שתי ההגדרות נכונות, וצריך לזכור שמדובר בסך הכול במבנה גיאומטרי מסוים של שכבות הסיליקון המרכיבות את החיישן. ניתן להחזיק את החיישנים במצב שבו אינם קולטים מטען כלל, ורק ברגע קבלת האות המתאים הם מתחילים להמיר את האור הפוגע בהם. בצורה זו ניתן לשלוט על "זמן החשיפה", בדומה לתריס המכני שבמצלמת הסרט. במצלמה המצלמת תמונה בודדת ניתן תיאורטית לקצר או להאריך את משך החשיפה כדי להתאימה לעוצמת האור. גם במצלמת טלוויזיה, ה"מייצרת" מספר קבוע של תמונות בשנייה, ניתן לצמצם את

נקודה על הצג. מכיוון שמהירות הסריקה גבוהה יחסית לזמן התגובה של העין והמוח, ומכיוון שלחומר הפלואורוסצנטי שעל הצג יש זיכרון מסוים – העין אינה מבחינה כלל בסריקה והתמונה שאנו רואים נראית כאילו נוצרה בבת אחת על כל שטח הצג. חסרונה העיקרי של שיטת סריקה אלקטרונית זו, היא שכדי שהאלקטרוניים יוכלו לנוע ולהגיע לצג צריך לשאוב את כל האוויר בדרכם. זו הסיבה שכל המערכת שתיארנו כעת, נמצאת בתוך שפופרת ריק, ומכאן שמה.



מסך מצופה בחומר מלאורסצנטי

צג טלוויזיה שפופרת קרן קתודית

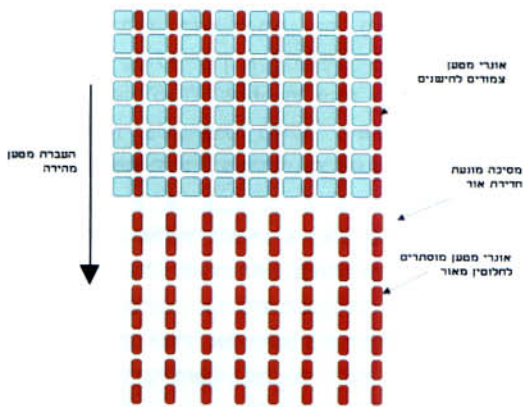
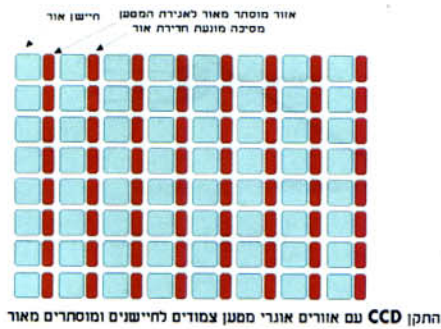
מצלמת הטלוויזיה

כעשרים שנה נוספות, לאחר המצאת שפופרת הקרן הקתודית, נדרשו כדי לפתח את מצלמת הטלוויזיה המבוססת על סריקת קרן אלקטרוניים. כמו במקרים רבים נוספים, שני ממצאים נלחמו על זכות הראשונים. ממציא אמריקאי צעיר בשם פילו טיילור פארנסוורת רשם כבר בשנת 1930 פטנט על מערכת טלוויזיה שלמה הכוללת מצלמה, משדר מקלט וצג, אך המצלמה היתה בעצם עיקר ההמצאה. פילו התקין לוח רגיש לאור בתוך שפופרת ריק, ועל צדו האחד של הלוח הידמה, בעזרת עדשה מתאימה, את התמונה ה"מצולמת". את צדו השני של הלוח סרק בעזרת קרן אלקטרוניים, ומדד את עוצמת הזרם של הקרן. עוצמת הזרם השתנתה בהתאם לעוצמת האור שפגעה באזורים השונים של הלוח וכך ניתן היה, ללא כל אמצעים מכניים, לסרוק תמונה ולתרגמה לרצף של אותות חשמליים.

רגישות המצלמה היתה חלשה, ונדרשו עוד מספר שנים של פיתוח עד שממציא נוסף, ולדימיר זורקין, הצליח לשכלל את מצלמת הטלוויזיה ולפתח מערכת מסחרית עובדת. עיקר השכלול היה בסריקת הלוח הרגיש מאותו הכיוון שבו פגע האור. לשפופרת הצילום שהמציא קרא איקונוסקופ, והיא היתה לבה של מצלמת הטלוויזיה המסחרית הראשונה. עם הזמן שוכללה המצלמה, הלוח הרגיש לאור שופר והוחלף ללוח המחולק למאות אלפי חישני אור נפרדים כדי למנוע זרימת זרם בתוך הלוח עצמו. סריקת הלוח חזרה לצדו האחורי בכדי להקטין את ממדי השפופרת, פותחו חומרים רגישים יותר לאור, זרם האלקטרוניים נעשה חד וממוקד וכך השתפרה איכות התמונה ללא הכר.

כל אות צריך להיות קצר יותר מקודמו. זאת ועוד: גם טשטוש בשיעור 5% יכול להוות בעיה, אם מדובר בהפרעה בהירה על רקע כהה. פנס רחוב או מכונית בצילום לילה, "יימרחו" לקו בוחק לכל גובה התמונה.

הדרך המעשית למנוע הפרעות אלו היא לכסות את האזור האוגר את המטען (הקבל/בור הפוטנציאל) הצמוד לחיישן בחומר שאינו מעביר אור (מסיכה). למעשה, מחלקים כל אלמנט במטריצה לשניים – חלק הקולט את האור (חיישן) וחלק האוגר את המטען (קבל). אות חשמלי בסיום "החשיפה" מעביר את המטען מהחיישן לקבל "המוצל". המטענים עוברים באזורים "המוצלים", וניתן להמשיך ולקלוט אור באותו הזמן ולנצל את כל זמן החשיפה לצורך העברת המטענים.



חיישן CCD עם אזורים מוצלים לאגירת והעברת המטען

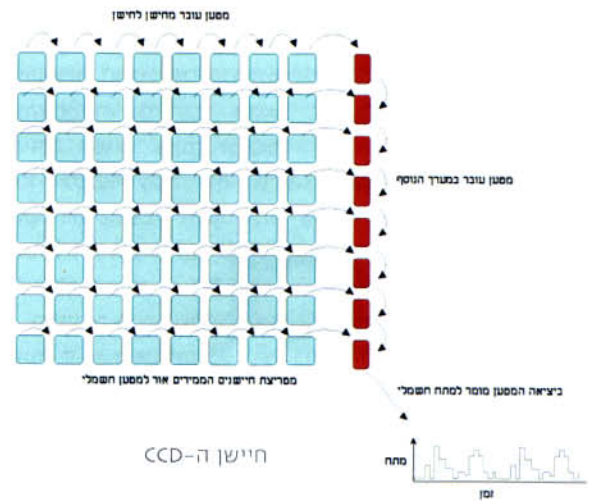


צילום של חיישני CCD

התקן ה-CCD מיוצר אמנם על גבי פיסת סיליקון בתהליך הדומה לזה של מעגלים משולבים אחרים, אך העברת המטען בין "בורות הפוטנציאל" עד ליציאה מהרכיב היא תהליך אנלוגי. מרבית המעגלים המשולבים בשוק הם דיגיטליים, והם מיוצרים בתהליך המכונה CMOS (Complementary Metal Oxide Silicon), שבתרגום חופשי פירושו "תהליך משלים הכולל מתכת וחמצון סיליקון". השם הוא היסטורי, ובהתקן הנוצר אין עוד זכר כמעט למתכת, אך הדבר

זמן החשיפה כדי למנוע "מריחה" בצילום תנועות מהירות. השלב הבא, לאחר החשיפה, הוא מתן אותות חשמליים לבורות הפוטנציאל כך שמטען כל בור מועבר הצידה לבור הסמוך. אפשר לדמיין את האותות כדליים המעבירים מים (מטען חשמלי) מבור לבור. המטענים מהחיישנים הקיצונים עוברים למערך נוסף של בורות, וממנו הם יוצאים החוצה בצורת זרם חשמלי.

קצב הוצאת המטענים מהמערך הנוסף הזה צריך להיות מהיר פי כמה מזה של שאר המטענים. אם למשל מכילה המטריצה 10,000 חיישנים (100x100), כל 100 המטענים שבמערך צריכים לצאת החוצה בזה אחר זה, לפני שייכנסו 100 מטענים מהחיישנים הקיצוניים שבכל שורה.



חיישן ה-CCD

פתרונות לפנסי רחוב בלילה

למרות פשטות הרעיון, כרוך השימוש המעשי בלא מעט בעיות פיזיקליות והנדסיות. אחת מהן, היא למשל כיצד למנוע מחיישן האור להמשיך ולייצר מטען בזמן ההעברה. מטען כזה יגרום לפסים ו"מריחה" של התמונה. למטען החשמלי אין "היסטוריה", ואין כל אפשרות לדעת אם מטען הנמצא, למשל, בנקודה 3,3, נוצר כתוצאה מאור שפגע בחיישן הצמוד אליו בשלב החשיפה, או שהוא מטען שהגיע מחיישן 2,3 ומועבר הלאה לתחנה 4,3.

במצלמת סרט ובמצלמות ה-CCD הראשונות היה פשוט תריס מכני שנפתח לצורך חשיפת אור לזמן קצר ונסגר מיד אחר כך, אך תריס מכני מסוג זה וסינכרונו עם האלקטרוניקה מסורבל מאוד את המצלמה. תיאורטית, ניתן פשוט לבצע את הסריקה במהירות גבוהה פי כמה מזמן החשיפה. אם, לדוגמה, זמן החשיפה הוא 20 אלפיות שנייה (50 תמונות בשנייה), וזמן הסריקה הוא רק אלפית שנייה, מידת הטשטוש תהיה רק 5%. אך כדי לסרוק מערך של מיליון חיישנים באלפית שנייה יש צורך באותות חשמליים שנמשכים פחות מנאנו (מיליארדית) שנייה. מכיוון שכל העברת מטען דורשת רצף של מספר אותות,



