Contents

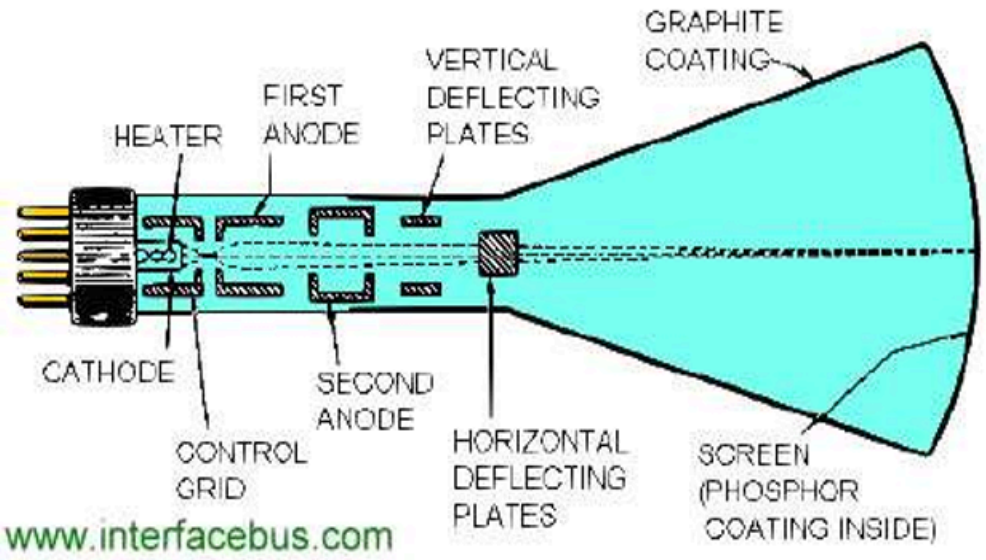
1. Refresh Cathode-Ray Tube
2. Raster Scan Displays
3. Random-Scan Displays
4. Color CRT Monitors
   - 4.1 Beam-Penetration Method
   - 4.2 Shadow-Mask Method
5. Direct-View Storage Tubes
6. Flat-Panel Displays
   - 6.1 Plasma Panel
   - 6.2 Thin-Film Electroluminescent Display

🖥️ Computer Graphics — Video Display Devices (Lecture 2)

Refresh Cathode-Ray Tube

The following figure illustrates the basic operation of a CRT. A beam of electrons (cathode rays) emitted by an electron gun, passes through focusing and deflection systems that direct the beam toward specified positions on the phosphor coated screen. The phosphor then emits a small spot of light at each position contacted by the electron beam. Because the light emitted by the phosphor fades very rapidly, the picture is redrawn repeatedly and quickly.

Refresh Cathode-Ray Tube



Working Principle of CRT

- Heat is supplied to the cathode by current through filament, which produces electrons.
- Intensity of the electron beam is controlled by setting voltage levels on the control grid. A high negative voltage shut off the beam, and a smaller negative voltage simply decreases the number of electrons in the beam.
- The focusing system is needed to force the electron beam to converge into a small spot as it strikes the phosphor.
- The resolution is referred as the number of points per centimeter that can be plotted horizontally and vertically. Eg. 1280 × 1024.
- Aspect ratio: Ratio of vertical points to horizontal points necessary to produce equal-length lines in both directions on the screen.

📌 Slide 3–5 → Refresh Cathode-Ray Tube (CRT)

CRT কী?

CRT (Cathode-Ray Tube) হলো সবচেয়ে পুরনো ও ক্লাসিক ধরনের display device। এটা বোঝাটা জরুরি কারণ বাকি সব display-এর তুলনা CRT-এর সাথেই করা হয়।

CRT-এর মূল কাজ হলো — একটা **electron gun (**ইলেকট্রন বন্দুক**)** থেকে ইলেকট্রনের বিম (beam) ছোড়া হয়। সেই beam একটা **phosphor-coated screen (**ফসফর**-**আবৃত পর্দা**)**-এ আঘাত করলে সেখানে আলোর ছোট ছোট বিন্দু তৈরি হয়। এই বিন্দুগুলো মিলে ছবি তৈরি হয়।

কিন্তু সমস্যা হলো — phosphor-এর আলো খুব দ্রুত নিভে যায়। তাই ছবিটাকে বারবার, খুব দ্রুত আঁকতে হয়। এই বারবার আঁকার প্রক্রিয়াকে বলে **Refreshing**।

কীভাবে কাজ করে — ধাপে ধাপে

ধাপ ১ **— Electron** তৈরি**:** Cathode (ক্যাথোড)-এ filament দিয়ে তাপ দেওয়া হয়। তাপের কারণে ইলেকট্রন বেরিয়ে আসে।

ধাপ ২ **— Beam-**এর শক্তি নিয়ন্ত্রণ**: Control Grid (**কন্ট্রোল গ্রিড**)** নামে একটা অংশ beam-এর intensity (উজ্জ্বলতা) নিয়ন্ত্রণ করে। ইলেকট্রন বিম (Electron Beam) হলো একঝাঁক বা একটি অবিচ্ছিন্ন প্রবাহমান ইলেকট্রনের ধারা, যা একটি নির্দিষ্ট দিকে অত্যন্ত দ্রুতগতিতে ছুটে চলে। এটি দেখতে অনেকটা আলোর রশ্মি বা লেজার লাইটের মতো সোজা লাইনে কাজ করে, তবে আলোর বদলে এখানে থাকে ঋণাত্মক চার্জযুক্ত কণা বা ইলেকট্রন।

- Grid-এ high negative voltage দিলে → beam বন্ধ হয়ে যায়
- কম negative voltage দিলে → beam-এ কম ইলেকট্রন, কম উজ্জ্বলতা

ধাপ ৩ — **Focusing: Focusing System** beam-কে একটা ছোট বিন্দুতে কেন্দ্রীভূত করে, যাতে screen-এ sharp point তৈরি হয়।

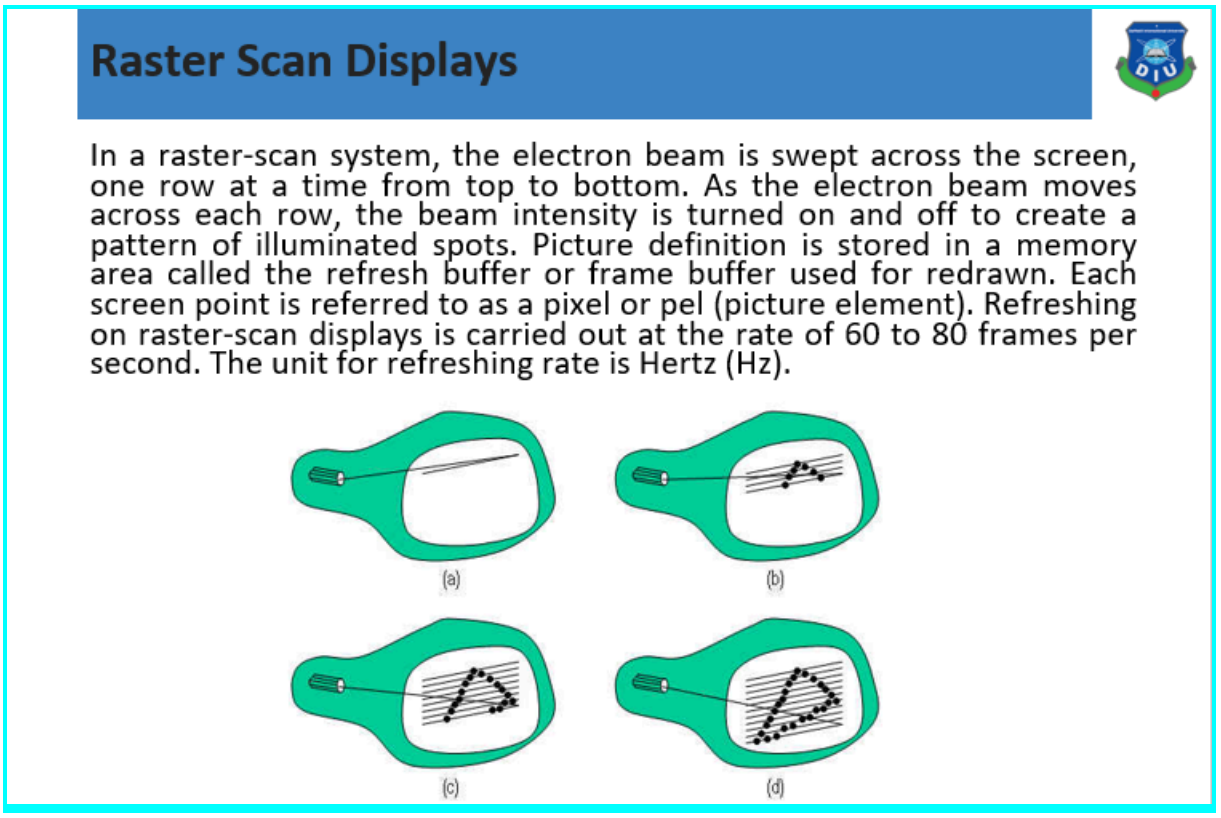
ধাপ ৪ — **Deflection: Deflection System** beam-কে বাঁ-ডান, উপর-নিচে সরায়, যাতে screen-এর যেকোনো জায়গায় আঁকা যায়।

ধাপ ৫ — **Screen-**এ আলো: Beam screen-এর phosphor-এ আঘাত করলে আলো বের হয়। কিন্তু সেই আলো দ্রুত মিলিয়ে যায়, তাই ছবি বারবার refresh করতে হয়।

গুরুত্বপূর্ণ শব্দ

Resolution (রেজোলিউশন**):** Screen-এ horizontally ও vertically কতটি point আঁকা যায় তার সংখ্যা। যেমন — 1280 × 1024 মানে আনুভূমিকভাবে 1280টি এবং উলম্বভাবে 1024টি বিন্দু।

Aspect Ratio (অ্যাসপেক্ট রেশিও**):** উলম্ব ও আনুভূমিক point-এর অনুপাত, যাতে দুই দিকে সমান দৈর্ঘ্যের রেখা সমান দেখায়।



📌 Slide 6 → Raster Scan Displays (রাস্টার স্ক্যান ডিসপ্লে)

মূল ধারণা

Raster Scan হলো আজকের দিনের সবচেয়ে পরিচিত পদ্ধতি — TV, Computer Monitor সব এই পদ্ধতিতে কাজ করে।

এই পদ্ধতিতে electron beam screen-এর উপর থেকে নিচে, প্রতিটা row (সারি) একের পর এক scan করে। এটাকে **Raster (র‍্যাস্টার)** বলে — ঠিক যেভাবে তুমি বই পড়ো, লাইন বাই লাইন।

প্রতিটা row scan করার সময় beam-কে on ও off করা হয়। যেখানে on — সেখানে আলো, যেখানে off — সেখানে অন্ধকার। এই আলো-অন্ধকারের pattern মিলে ছবি তৈরি হয়।

গুরুত্বপূর্ণ concept

Frame Buffer / Refresh Buffer (ফ্রেম বাফার): একটা বিশেষ memory যেখানে পুরো screen-এর ছবির তথ্য (কোন pixel জ্বলবে, কোনটা নেভানো থাকবে) সংরক্ষিত থাকে। screen refresh করার সময় এই buffer থেকে তথ্য পড়া হয়।

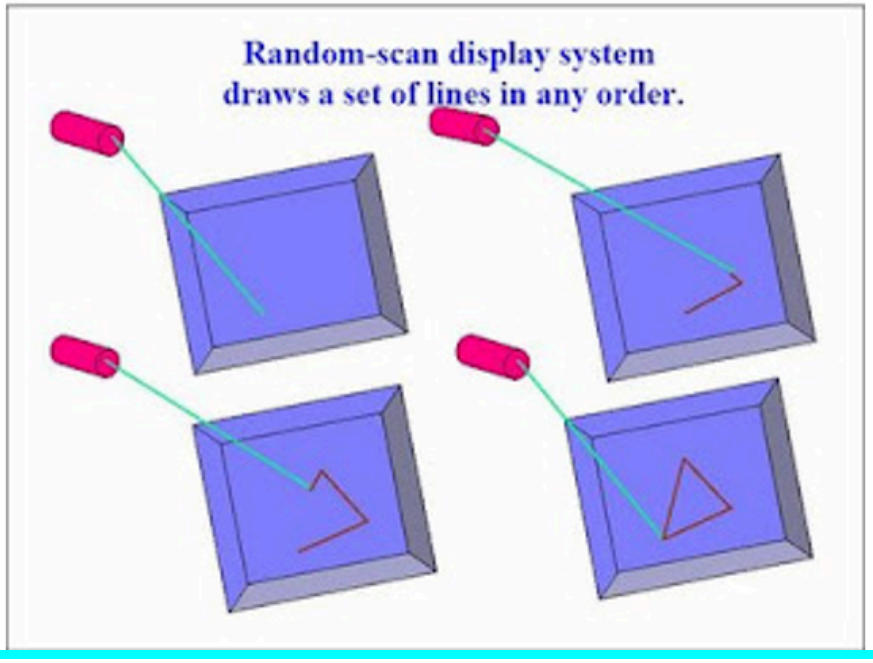
Pixel / Pel (পিক্সেল): Screen-এর প্রতিটা ছোট আলোকিত বিন্দুকে বলে Pixel (Picture Element)। Raster screen হলো হাজার হাজার pixel-এর সমষ্টি। dot, point

Refresh Rate (রিফ্রেশ রেট): প্রতি সেকেন্ডে কতবার পুরো screen পুনরায় আঁকা হয়। Raster display-এ এটা সাধারণত **60** থেকে **80 Hz** — মানে প্রতি সেকেন্ডে 60–80 বার।

> সহজ উদাহরণ: ধরো তুমি একটা Flipbook বানাচ্ছো। প্রতিটা পাতায় একটু পরিবর্তিত ছবি। যখন দ্রুত উল্টাও, ছবি নড়তে দেখো। Raster display-ও তাই করে — শুধু সেকেন্ডে 60-80 বার।

Random Scan Displays

- The CRT has the electron beam directed only to the parts of the screen where a picture is to be drawn. Random-scan monitors draw a picture one line at a time, called as vector display.
- Refresh rates on a ransom-scan system depends on the number of lines to be displayed. Picture definition is stored as a set of line-drawing commands in the refresh display file or refresh buffer.
- These systems are designed for the line-drawing applications and can't display realistic shaded scenes.



📌 Slide 7 → Random Scan Displays (র‍্যান্ডম স্ক্যান ডিসপ্লে)

মূল ধারণা

Random Scan (আরেক নাম **Vector Display**) — এখানে electron beam পুরো screen scan করে না। শুধু যেখানে কিছু আঁকতে হবে সেখানে সরাসরি যায়।

যেমন একটা triangle আঁকতে হলে — beam সরাসরি তিনটা রেখা ধরে চলবে, বাকি screen-এ যাবেই না। তাই নাম **Random** — এলোমেলো বা যেখানে দরকার সেখানে।

কীভাবে কাজ করে

এই system-এ ছবির তথ্য রাখা হয় **Refresh Display File** বা **Refresh Buffer**-এ। কিন্তু এখানে তথ্য pixel আকারে নয় — সরাসরি **line-drawing commands (**লাইন আঁকার নির্দেশনা**)** আকারে থাকে।

Refresh rate নির্ভর করে কতগুলো line আঁকতে হবে তার উপর।

Raster vs Random — পার্থক্য এক নজরে

Random scan লাইন-চিত্র **(line drawing)** অ্যাপ্লিকেশনের জন্য তৈরি। এটা দিয়ে realistic shaded scene বা রঙিন ছবি দেখানো সম্ভব নয়। কিন্তু geometrical shape খুব sharp ও smooth আঁকা যায়।

Color CRT Monitors

- Two basic methods are used for producing color displays
  - ✓ Beam penetration and
  - ✓ shadow-mask method.

📌 Slide 9–11 → Color CRT Monitors (রঙিন CRT মনিটর)

রঙিন CRT তৈরির দুটো প্রধান পদ্ধতি আছে।

Beam-Penetration Method

- The beam penetration method for displaying color pictures has been used with random scan monitors.
- Two layers of phosphor, usually red and green are coated onto the screen and the displayed color depends on how far the electron beam penetrates into the phosphor layers.
- A beam of slow electrons excites only the outer red layer, fast electrons penetrates through red layer and excites the inner green layer. The electrons with intermediate speed produce the combinations of red and green color are emitted to show two additional colors, orange and yellow.
- The speed of electrons is controlled by the beam-acceleration voltage. But the quality of the pictures is not good here.

পদ্ধতি ১: Beam-Penetration Method (বিম-প্রবেশ পদ্ধতি) — Slide 10

মূল ধারণা: Screen-এ দুটো layer-এ phosphor লাগানো থাকে — বাইরের layer লাল (Red), ভেতরের layer সবুজ (Green)। Beam কতটা গভীরে যাবে তার উপর নির্ভর করে রঙ বদলায়।

কীভাবে রঙ তৈরি হয়:

Beam-এর গতি	কোথায় পৌঁছায়	কী রঙ দেখায়
ধীর (Slow)	শুধু বাইরের Red layer	লাল (Red)

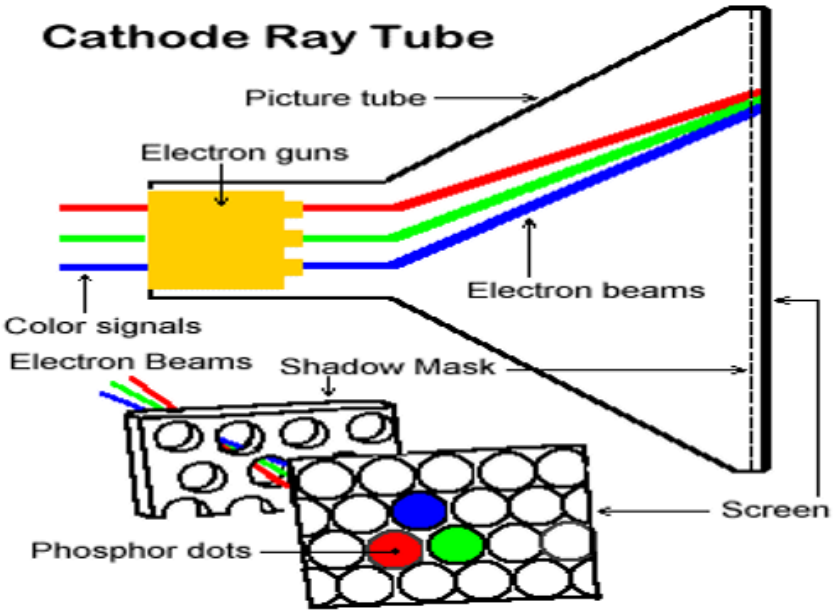
দ্রুত (Fast)	ভেতরের Green layer পর্যন্ত	সবুজ (Green)
মাঝারি (Medium)	দুই layer-এর মাঝে	কমলা (Orange) বা হলুদ (Yellow)

Beam-এর গতি নিয়ন্ত্রণ করা হয় **beam-acceleration voltage** দিয়ে।

সীমাবদ্ধতা: মাত্র ৪টি রঙ তৈরি করা যায়। ছবির মান ভালো না। শুধু Random scan monitor-এ ব্যবহার হয়।

Shadow-Mask Method

- It can produce a much wider range of color than the beam-penetration method. A shadow-mask CRT has three phosphor color dots at each pixel position with red, green and blue. This type of CRT has three electron guns, one for each color. The three electron beams are deflected and focused as a group onto the shadow mask, which contains corresponding holes for each pixel position.
- The color variation is obtained by varying the intensity levels of the three electron beams. For example, turning off the green and red beam, we will get only blue color.



পদ্ধতি ২: **Shadow-Mask Method** (শ্যাডো-মাস্ক পদ্ধতি) **— Slide 11**

মূল ধারণা: প্রতিটা pixel-এ তিনটা করে phosphor dot থাকে — একটা লাল, একটা সবুজ, একটা নীল (RGB)। তিনটা আলাদা electron gun তিনটা রঙের জন্য।

কীভাবে কাজ করে:

তিনটা beam একসাথে **Shadow Mask**-এর দিকে directed হয়। Shadow Mask হলো একটা metal plate যাতে ছোট ছোট ছিদ্র আছে। প্রতিটা ছিদ্র একটা pixel position-এর সাথে মেলে।

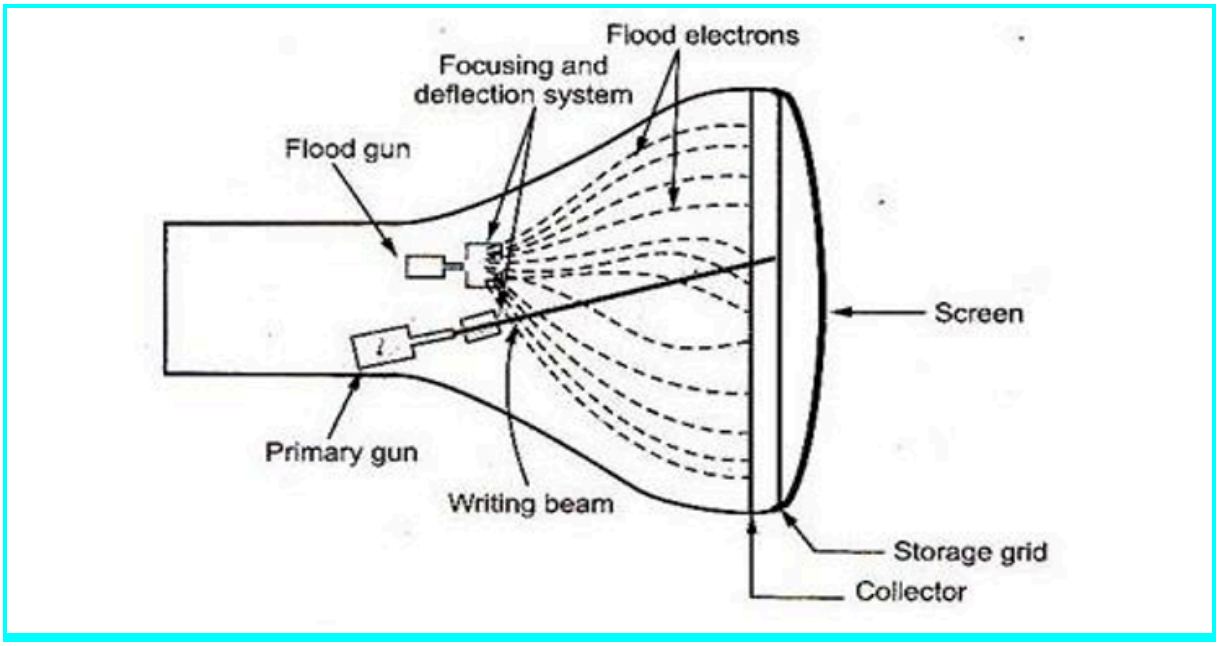
তিনটা beam-এর intensity আলাদাভাবে নিয়ন্ত্রণ করে যেকোনো রঙ তৈরি করা যায়।

উদাহরণ: শুধু Blue gun চালু রাখলে → নীল রঙ। তিনটাই সমানভাবে চালু → সাদা রঙ।

সুবিধা: Beam-Penetration পদ্ধতির চেয়ে অনেক বেশি রঙ তৈরি করা যায়। ছবির মান অনেক ভালো। আজকের CRT TV ও monitor-এ এই পদ্ধতিই ব্যবহার হয়।

Direct-View Storage Tubes

- An alternative method for maintaining a screen image is to store the picture information inside the CRT instead of refreshing the screen.
- A direct-view storage device stores the picture information as a charge distribution just behind the phosphor coated screen. Two electron guns are used, the primary gun is used to store the picture pattern, the second, the floor gun, maintains the picture display.



📌 Slide 13–15 → Direct-View Storage Tubes (DVST)

মূল ধারণা

CRT-এ যে সমস্যা — screen বারবার refresh করতে হয় — DVST সেই সমস্যার সমাধান দেয়।

DVST (Direct-View Storage Tube) ছবির তথ্য screen-এর ভেতরেই সংরক্ষণ করে। বারবার refresh করার দরকার নেই।

কীভাবে কাজ করে

ছবির তথ্য phosphor-coated screen-এর ঠিক পেছনে **charge distribution** (আধানের বিন্যাস) হিসেবে রাখা হয়।

দুটো electron gun ব্যবহার করা হয়:

- **Primary Gun** (প্রাথমিক বন্দুক)**:** ছবির pattern সংরক্ষণ করে
- **Flood Gun** (ফ্লাড বন্দুক)**:** সংরক্ষিত ছবি display করে রাখে

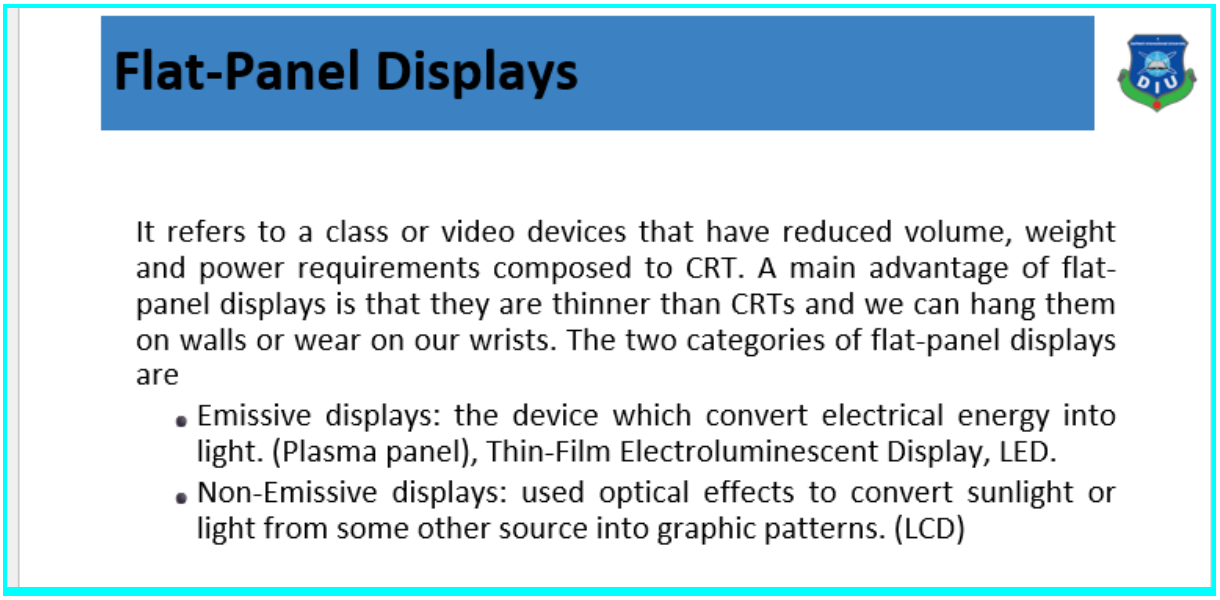
সুবিধা **(Advantages)**

Refresh লাগে না বলে — অনেক জটিল ও বিস্তারিত ছবি খুব উচ্চ resolution-এ flicker ছাড়া দেখানো যায়।

> **Flicker** (ফ্লিকার)**:** Refresh rate কম হলে screen কাঁপা-কাঁপা বা ঝাঁকানো দেখায়। একে flicker বলে। DVST-তে refresh নেই তাই flicker নেই।

অসুবিধা **(Disadvantages)**

রঙ দেখাতে পারে না। আর একটা বড় সমস্যা হলো — ছবির কোনো নির্দিষ্ট অংশ মুছে ফেলা যায় না। একটা অংশ মুছতে হলে পুরো screen মুছতে হবে এবং বাকি সব আবার আঁকতে হবে। এটা অনেক সময়সাপেক্ষ।



📌 Slide 16 → Flat-Panel Displays (ফ্ল্যাট-প্যানেল ডিসপ্লে)

মূল ধারণা

CRT বড়, ভারী, এবং অনেক বিদ্যুৎ খরচ করে। Flat-Panel Display এই সমস্যার সমাধান।

Flat-Panel Display হলো এমন display যা CRT-এর তুলনায়:

- অনেক পাতলা **(thinner)**
- অনেক হালকা **(lighter)**
- অনেক কম বিদ্যুৎ খরচ করে

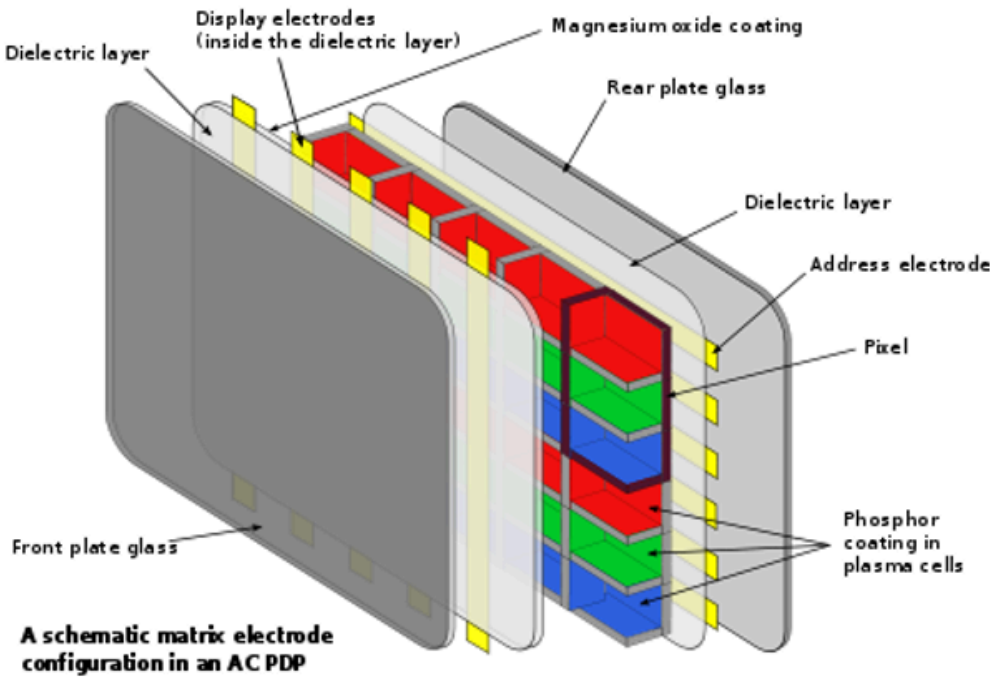
দেওয়ালে ঝোলানো যায়, হাতঘড়িতে পরা যায় — এমন display তৈরি সম্ভব হয়েছে Flat-Panel-এর কারণে।

দুটো শ্রেণি

Emissive Display (আলো নির্গতকারী**):** নিজেই বিদ্যুৎ শক্তিকে সরাসরি আলোতে রূপান্তর করে। উদাহরণ: Plasma Panel, Thin-Film Electroluminescent Display, LED

Non-Emissive Display (আলো-রূপান্তরকারী**):** নিজে আলো তৈরি করে না। বাইরের আলো (সূর্যের আলো বা backlight) ব্যবহার করে ছবি তৈরি করে। উদাহরণ: LCD

Plasma Panel



A schematic matrix electrode configuration in an AC PDP

How plasma displays works

- A plasma display panel is an array of hundreds of thousands of small, luminous (radiant) cells positioned between two plates of glass. Each cell is essentially a tiny neon lamp. A plasma display panel is an array of hundreds of thousands of small, luminous (radiant) cells positioned between two plates of glass. Each cell is essentially a tiny neon lamp filled with rarefied neon, xenon, and other inert gases; the cells are luminous when they are electrified through "electrodes".

Plasma Panel

- The long electrodes are stripes of electrically conducting material that also lie between the glass plates, in front of and behind the cells. The "address electrodes" sit behind the cells, along the rear glass plate, and can be opaque. The transparent display electrodes are mounted in front of the cell, along the front glass plate. As can be seen in the illustration, the electrodes are covered by an insulating protective layer. Control circuitry charges the electrodes that cross paths at a cell, creating a voltage difference between front and back. Some of the atoms in the gas of a cell then lose electrons and become ionized, which creates an electrically conducting plasma of atoms, free electrons, and ions. The collisions of the flowing electrons in the plasma with the inert gas atoms leads to light emission; such light-emitting plasmas are known as glow discharges.

Plasma Panel

Advantages

Picture quality

- Capable of producing deeper blacks allowing for superior contrast ratio.
- Wider viewing angles than those of LCD; images do not suffer from degradation at high angles like LCDs
- Less visible motion blur, very high refresh rates and a faster response time, contributing to superior performance when displaying content with significant amounts of rapid.

Plasma Panel

Disadvantages

- Earlier generation displays were more susceptible to screen burn-in and image retention, recent models which reduces the effect of burn-in but does not prevent it.
- Use more electricity, on average, than an LCD TV.
- Do not work as well at high altitudes due to pressure differential between the gases inside the screen and the air pressure at altitude. It may cause a buzzing noise. Manufacturers rate their screens to indicate the altitude parameters.
- For those who wish to listen to AM radio, or are Amateur Radio operators (Hams) or Shortwave Listeners (SWL), the Radio Frequency Interference (RFI) from these devices can be irritating or disabling.
- Due to the strong infrared emissions inherent with the technology, standard IR repeater systems cannot be used in the viewing room. A more expensive "plasma compatible" sensor must be used.

📌 Slide 17–21 → Plasma Panel (প্লাজমা প্যানেল)

মূল ধারণা

Plasma Display হলো দুটো কাচের plate-এর মাঝে লক্ষ লক্ষ ছোট ছোট cell (কোষ) দিয়ে তৈরি। প্রতিটা cell একটা ক্ষুদ্র **neon lamp** (নিয়ন বাতি)-র মতো কাজ করে।

প্রতিটা cell-এ থাকে **Neon, Xenon** এবং অন্যান্য inert gas (নিষ্ক্রিয় গ্যাস)। বিদ্যুৎ প্রবাহিত হলে এই gas আলো দেয়।

কীভাবে কাজ করে

দুই ধরনের electrode (তড়িৎদ্বার) আছে:

Address Electrodes: কাচের পেছনের দিকে। এরা opaque (অস্বচ্ছ) হতে পারে।

Display Electrodes: কাচের সামনের দিকে। এরা transparent (স্বচ্ছ) হয় যাতে আলো বের হতে পারে। Insulating layer দিয়ে ঢাকা থাকে।

যখন সামনের ও পেছনের electrode-এ voltage দেওয়া হয়, তখন cell-এর gas-এর atom থেকে electron ছুটে বেরিয়ে **plasma** তৈরি করে। এই plasma থেকে **glow discharge** — অর্থাৎ আলো বের হয়।

Plasma Panel-এর সুবিধা — Slide 20

ছবির গভীর কালো রঙ **(Deeper Blacks):** অনেক উন্নত contrast ratio — কালো আরও কালো দেখায়।

বড় **viewing angle:** LCD-এর মতো কোণ থেকে দেখলে রঙ বিকৃত হয় না। অনেক দিক থেকে সমানভাবে দেখা যায়।

দ্রুত **response time:** Fast-moving content-এ motion blur (নড়াচড়ায় ঝাপসা দেখা) অনেক কম। High refresh rate-এর কারণে।

Plasma Panel-এর অসুবিধা — Slide 21

Screen burn-in: যদি একই ছবি অনেকক্ষণ screen-এ থাকে তাহলে সেটার ছাপ পড়ে যায়। আধুনিক model-এ কমানো হয়েছে, কিন্তু পুরোপুরি দূর হয়নি।

বেশি বিদ্যুৎ খরচ**:** LCD-এর চেয়ে গড়ে বেশি বিদ্যুৎ ব্যবহার করে।

উচ্চতায় সমস্যা**:** বেশি উচ্চতায় (যেমন পাহাড়ে) ভেতরের gas ও বাইরের বায়ুচাপের পার্থক্যের কারণে buzzing শব্দ করে।

Radio Frequency Interference (RFI): AM radio বা Amateur Radio অপারেটরদের কাজে বাধা দিতে পারে।

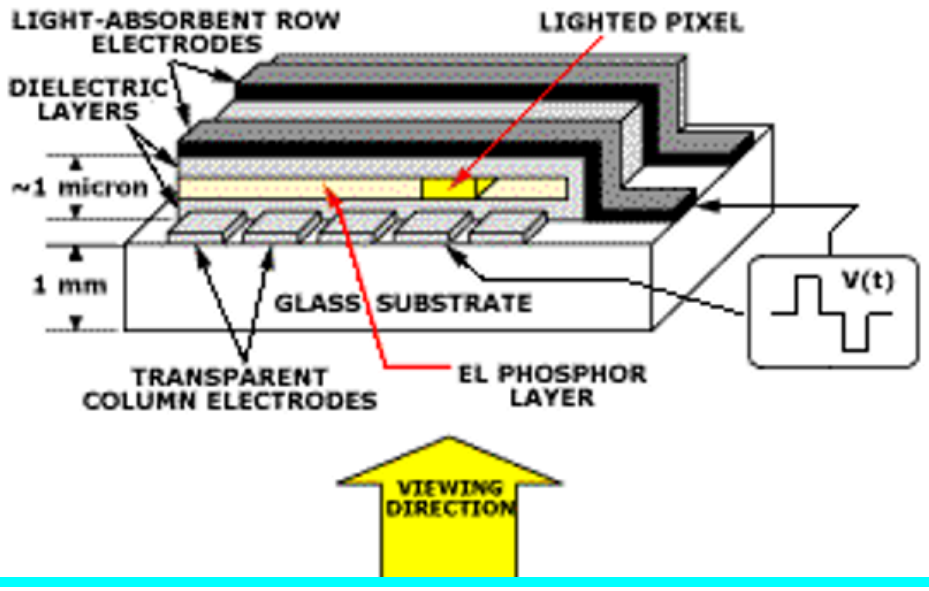
Infrared emission সমস্যা**:** এই display থেকে শক্তিশালী infrared বের হয়, তাই সাধারণ IR remote control system কাজ করে না। বিশেষ "plasma compatible" sensor লাগে।

Thin-Film Electroluminescent Display

- The thin film EL glass panel consists of a luminescent phosphor layer sandwiched between transparent dielectric layers and a matrix of row and column electrodes. A circuit board containing the drive and control electronics is connected to the back of the glass panel. Voltage is applied to row and column electrodes causing the area of intersection (a pixel) to emit light.

- The result of this solid-state design is a flat, compact, reliable, and inherently rugged display with exceptionally fast response times (< 1 ms).

Thin-Film Electroluminescent Display



📌 Slide 22–23 → Thin-Film Electroluminescent Display (TFELD)

মূল ধারণা

Thin-Film Electroluminescent Display — নাম দেখেই বোঝা যায়:

- **Thin-Film (**পাতলা আবরণ**):** অত্যন্ত পাতলা layer দিয়ে তৈরি
- **Electroluminescent:** বিদ্যুৎ দিলে নিজেই আলো দেয়

গঠন

এটা মূলত একটা **sandwich structure (**স্যান্ডউইচ কাঠামো**)**:

Row Electrodes
↓
Transparent Dielectric Layer (স্বচ্ছ অন্তরক স্তর)
↓
Luminescent Phosphor Layer (আলো নির্গতকারী ফসফর স্তর) ← এখানে আলো তৈরি হয়
↓
Transparent Dielectric Layer
↓
Column Electrodes

পেছনে একটা **circuit board** লাগানো থাকে যা drive ও control electronics ধারণ করে।

কীভাবে কাজ করে

Row electrode ও Column electrode-এ voltage দেওয়া হয়। দুটো electrode যেখানে cross করে — সেই intersection point হলো একটা **pixel**। সেই point-এ আলো জ্বলে ওঠে।

বৈশিষ্ট্য

এটা **solid-state (**কঠিন**-**অবস্থার**)** design — মানে কোনো moving part নেই, gas নেই। তাই এটা:

- পাতলা (flat ও compact)
- নির্ভরযোগ্য (reliable)
- মজবুত (rugged — ধাক্কা সহ্য করতে পারে)
- অত্যন্ত দ্রুত response time — ১ **millisecond-**এরও কম (< 1 ms)

📌 শেষে বড় **Comparison —** সব **Display Device** একসাথে

বিষয়	**CRT**	**Raster Scan**	**Random Scan (Vector)**	**DVST**	**Plasma Panel**	**Thin-Film EL**
কীভাবে আঁকে	Electron beam, phosphor	Row by row, সব pixel scan	শুধু লাইন বরাবর	Charge distribution সংরক্ষণ	Gas-এ electric discharge	Phosphor layer-এ voltage
Refresh দরকার**?**	হ্যাঁ	হ্যাঁ (60–80 Hz)	হ্যাঁ (line সংখ্যার উপর)	না	না	না

রঙ দেখাতে পারে?	হ্যাঁ (Shadow-mask)	হ্যাঁ	সীমিত	না	হ্যাঁ	হ্যাঁ
ছবির ধরন	যেকোনো	Pixel-based, যেকোনো	শুধু line/geometric	জটিল line drawing	যেকোনো	যেকোনো
Flicker আছে?	হ্যাঁ (refresh rate কম হলে)	হ্যাঁ	হ্যাঁ	না	না	না
আকার	বড়, ভারী	বড়, ভারী	বড়, ভারী	বড়	পাতলা, flat	অত্যন্ত পাতলা
বিদ্যুৎ খরচ	বেশি	বেশি	বেশি	বেশি	বেশি (LCD-এর চেয়ে)	কম
Response time	মাঝামাঝি	মাঝামাঝি	মাঝামাঝি	—	দ্রুত	অত্যন্ত দ্রুত (< 1 ms)
Viewing angle	ভালো	ভালো	ভালো	—	অনেক ভালো	ভালো
নির্বাচিত অংশ মোছা	হ্যাঁ	হ্যাঁ	হ্যাঁ	না (পুরো screen মুছতে হয়)	হ্যাঁ	হ্যাঁ
মূল ব্যবহার	পুরনো TV/Monitor	আধুনিক monitor/TV	CAD, technical drawing	Scientific/engineering	বড় TV	Industrial display
সবচেয়ে বড় সমস্যা	বড়, ভারী	Aliasing/jaggies	Realistic scene দেখাতে পারে না	রঙ নেই, অংশ মোছা যায় না	Screen burn-in, বেশি বিদ্যুৎ	দাম বেশি

💡 মনে রাখার সহজ সূত্র:

- **Raster** = grid-এ লাইন বাই লাইন → TV-র মতো
- **Random/Vector** = শুধু লাইন আঁকে → CAD-এর মতো
- **DVST** = refresh নেই কিন্তু রঙ নেই, অংশ মোছা যায় না
- **Plasma** = neon gas, ভালো কালো রঙ কিন্তু বেশি বিদ্যুৎ

- **Thin-Film EL** = সবচেয়ে দ্রুত response, solid-state, মজবুত

LCD (Liquid Crystal Display)

কোথায়/কখন কাজ করে: এটা একটা **Non-Emissive** display — নিজে আলো তৈরি করে না, বাইরের আলো (backlight) ব্যবহার করে।

কীভাবে কাজ করে: দুই layer পোলারাইজিং material-এর মাঝে liquid crystal রাখা থাকে। Voltage দিলে crystal-এর molecule গুলো ঘুরে যায়, ফলে আলো হয় পার হতে পারে নয়তো block হয়। এভাবে light on/off নিয়ন্ত্রণ করে ছবি তৈরি হয়। Color পেতে প্রতিটা pixel-এ Red, Green, Blue filter থাকে।

Advantages:

- কম বিদ্যুৎ খরচ
- পাতলা ও হালকা
- Eye strain কম (CRT-র মতো flicker নেই)
- দাম তুলনামূলক কম

Disadvantages:

- Viewing angle সীমিত (পাশ থেকে দেখলে রঙ বিকৃত দেখায়)
- Response time তুলনামূলক ধীর (fast motion-এ ঝাপসা/blur হতে পারে)
- Backlight দরকার বলে সম্পূর্ণ কালো রঙ ঠিকমতো দেখাতে পারে না (black পুরোপুরি কালো হয় না)

LED (Light Emitting Diode) Display

কোথায়/কখন কাজ করে: এটা **Emissive** display — নিজেই বিদ্যুৎ থেকে সরাসরি আলো তৈরি করে। আজকাল বেশিরভাগ TV/Monitor-এ এটাই ব্যবহার হয় (আসলে এটা একধরনের উন্নত LCD, যেখানে backlight হিসেবে LED ব্যবহার হয়; আবার OLED হলো pure emissive)।

কীভাবে কাজ করে: প্রতিটা pixel-এ ছোট ছোট LED (diode) থাকে যেগুলো বিদ্যুৎ পেলে সরাসরি আলো দেয়। OLED-এ প্রতিটা pixel নিজে নিজে জ্বলে ও নেভে আলাদাভাবে।

Advantages:

- উজ্জ্বলতা (brightness) অনেক বেশি
- বিদ্যুৎ সাশ্রয়ী (LCD-এর চেয়ে আরও কম খরচ, বিশেষত OLED)
- Contrast ratio ভালো — গভীর কালো রঙ দেখাতে পারে (বিশেষত OLED, কারণ pixel নিজে নিজে বন্ধ হতে পারে)
- Response time দ্রুত — fast motion-এ ভালো
- Lifespan তুলনামূলক বেশি

Disadvantages:

- দাম তুলনামূলক বেশি (LCD-র চেয়ে)
- OLED-এ Screen burn-in সমস্যা হতে পারে (একই ছবি অনেকক্ষণ থাকলে ছাপ পড়ে)
- উৎপাদন খরচ বেশি

সংক্ষেপে মনে রাখার **trick:** LCD = backlight দরকার, কম দামি, viewing angle কম ভালো। LED/OLED = নিজে আলো দেয়, বেশি উজ্জ্বল, ভালো কালো রঙ, কিন্তু দামি।

পরিস্থিতি (Situation)	কোন Technique	কেন (Reason)
⏱️ Time কম (Real-time game, animation)	Area Sampling বা সাধারণ Supersampling না	Supersampling অনেক calculation লাগে। Real-time-এ frame দ্রুত আঁকতে হয়, তাই হালকা পদ্ধতি লাগে — Area sampling তুলনামূলক কম খরচে দ্রুত ফলাফল দেয়।
✏️ শুধু সরলরেখা (Straight line) আঁকতে চাও	Area Sampling (Weighted) অথবা Prefiltering (Pitteway-Watkinson)	এই পদ্ধতিগুলো বিশেষভাবে line/polygon-এর জন্য ডিজাইন করা। Coverage হিসাব করেই pixel-এর intensity বসায়, simple shape-এ অনেক efficient।
🖥️ High-end / High-configuration system (শক্তিশালী GPU/CPU আছে)	Supersampling (বিশেষত Adaptive)	বেশি resolution-এ render করে নামিয়ে আনা — অনেক memory ও processing power লাগে। High-config থাকলে এটাই সবচেয়ে ভালো quality দেয়, এবং hardware-independent।
📱 Low-end / কম শক্তির device (mobile, পুরনো PC)	Area Sampling	Supersampling-এর মতো ৪×+ memory/processing লাগে না। কম resource-এ কাজ করা সম্ভব।
🔺 জটিল আকৃতি (Complex/curved shape, irregular polygon)	Supersampling (Adaptive)	Area sampling জটিল shape-এ অনেক calculation দাবি করে (costly)। Supersampling shape নির্বিশেষে সমানভাবে কাজ করে — যেকোনো আকৃতির জন্য flexible।
🎯 শুধু Edge/প্রান্তে ভালো quality দরকার, বাকি জায়গায় না (efficiency চাও)	Adaptive Supersampling	শুধু edge-এর কাছে বেশি sample নেয়, flat জায়গায় কম sample নেয় — তাই unnecessary calculation বাঁচে। সবচেয়ে smart পদ্ধতি।
🔲 Repeating pattern-এ aliasing হচ্ছে (Moiré pattern-এর মতো সমস্যা)	Jittered Supersampling	Sample-গুলো random/ছড়ানোভাবে নেওয়া হয় বলে নিয়মিত pattern ভেঙে যায়, তাই Moiré-জাতীয় সমস্যা কমে।
💰 Memory/Storage সীমিত (budget constraint)	Area Sampling — Resolution বাড়ানো এড়িয়ে চলো	Resolution বাড়ানো পদ্ধতি ৪× memory দাবি করে — সবচেয়ে খরচসাপেক্ষ। Area sampling memory-friendly।

🎮 Modern Game / GPU rendering (industry standard)	Supersampling (SSAA/MSAA hardware ভিত্তিক)	আধুনিক GPU hardware-এ built-in support আছে। Hardware-independent বলে যেকোনো graphics card-এ কাজ করে, তাই industry-তে এটাই default choice।
📐 শুধু Polygon fill করতে চাও (নির্ভুলভাবে)	Prefiltering (Pitteway-Watkinson Algorithm)	এই algorithm বিশেষভাবে Bresenham's-কে পরিবর্তন করে polygon-এর জন্য বানানো — এক্ষেত্রে সবচেয়ে accurate ও efficient।

Time কম থাকলে (real-time game, animation) → ভারী Supersampling এড়িয়ে চলো, কারণ এতে calculation অনেক বেশি লাগে। সেক্ষেত্রে Area Sampling-ই better choice, কারণ এটা তুলনামূলক হালকা।

শুধু সরলরেখা **(straight line)** আঁকতে চাইলে → Area Sampling (বিশেষ করে Weighted) বা Prefiltering ভালো, কারণ এগুলো line/polygon-এর জন্যই বিশেষভাবে ডিজাইন করা।

High configuration (শক্তিশালী **system)** থাকলে → Supersampling, বিশেষত Adaptive Supersampling ব্যবহার করো। কারণ এটাই সবচেয়ে ভালো quality দেয়, কিন্তু resource বেশি লাগে — তাই শুধু high-end machine-এই practical।

জটিল আকৃতি বা **curve** হলে → Area sampling সেখানে costly হয়ে যায়, তাই Supersampling (Adaptive) বেশি কার্যকর, কারণ এটা shape নির্বিশেষে কাজ করে।

মূলত trade-off-টা হলো: **Area Sampling =** কম **resource, simple shape-**এ ভালো আর **Supersampling =** বেশি **resource,** সব ধরনের **shape-**এ **flexible** ও **high quality**।

1 Increasing Resolution (Resolution বাড়ানো)

Use যখন	তোমার hardware/monitor itself upgrade করার সুযোগ আছে এবং memory/processing power নিয়ে চিন্তা নেই। মূলত এটা standalone solution হিসেবে কম ব্যবহার হয় — অন্য technique-এর সাথে combine করেই বেশি কাজে লাগে।
এড়িয়ে চলো যখন	Memory/budget সীমিত, বা real-time/fast rendering দরকার — কারণ 8× memory ও processing লাগে।

2 Unweighted Area Sampling (Coverage-based)

Use যখন	দ্রুত, সাধারণ মানের anti-aliasing দরকার — শুধু pixel কতটুকু ঢাকা পড়েছে সেটা জানলেই চলবে। Simple line/shape, কম calculation power আছে এমন device-এ।
এড়িয়ে চলো যখন	খুব smooth/premium quality দরকার — কারণ এটা position (কোথায় পড়েছে) বিবেচনা করে না, তাই মান মাঝারি।

3 Weighted Area Sampling (Coverage + Position-based)

Use যখন	সরলরেখা (straight line) বা polygon edge-এ ভালো মানের smoothness চাও। Pixel-এর center থেকে দূরত্ব হিসাব করে বেশি accurate intensity দেয় বলে — যেখানে line/polygon rendering quality জরুরি।
এড়িয়ে চলো যখন	খুব জটিল/curved shape — কারণ calculation বেড়ে যায় এবং costly হয়ে পড়ে।

4 Prefiltering (Pitteway-Watkinson Algorithm)

Use যখন	শুধু Polygon fill বা line drawing করতে চাও এবং Bresenham's algorithm-ভিত্তিক system ব্যবহার করছো। এক্ষেত্রে এই algorithm সবচেয়ে accurate ও efficient।
এড়িয়ে চলো যখন	Polygon ছাড়া অন্য জটিল/irregular shape দিয়ে কাজ করছো — তখন calculation অনেক বেড়ে যায়, costly হয়ে পড়ে।

5 Supersampling (Postfiltering)

Use যখন	High-configuration system আছে, সর্বোচ্চ quality চাও, এবং যেকোনো ধরনের shape (curve, complex, irregular) নিয়ে কাজ করছো। Hardware-independent বলে modern game/GPU rendering-এ এটাই standard।
এড়িয়ে চলো যখন	Low-end device বা real-time-এ খুব দ্রুত frame দরকার — কারণ memory ও processing cost বেশি, virtual image-এর resolution বাড়ানোর সীমাও আছে।