



Η Επιστήμη Δεδομένων στη Βιομηχανία Ημιαγωγών: Εμπειρίες και Παραδείγματα

Γιώργος Τσιρογιάννης

Επικ. καθηγητής, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων Αγροτικών Προϊόντων και Τροφίμων, Πανεπ. Πατρών

Πάτρα, 12/03/2021

Δομή

Η γενική εικόνα της παραγωγής microchips

Βασικές έννοιες της φωτολιθογραφίας και οι τεχνικές προκλήσεις

Use case:
ο ρόλος της συλλογής πολλών δεδομένων και οι κατάλληλες ερωτήσεις

Use case:
Εντοπισμός του κατάλληλου προβλήματος και ο μετασχηματισμός σε machine learning μορφή

Use case:
Αποκαθιστώντας την εμπιστοσύνη των πελατών μέσω της χρήσης στατιστικών τεχνικών σε προβλήματα οπτικής

Use case:
Προσθέτοντας τον χαμένο σύνδεσμο στην μετρολογία





Headquarters Veldhoven, Ολλανδία



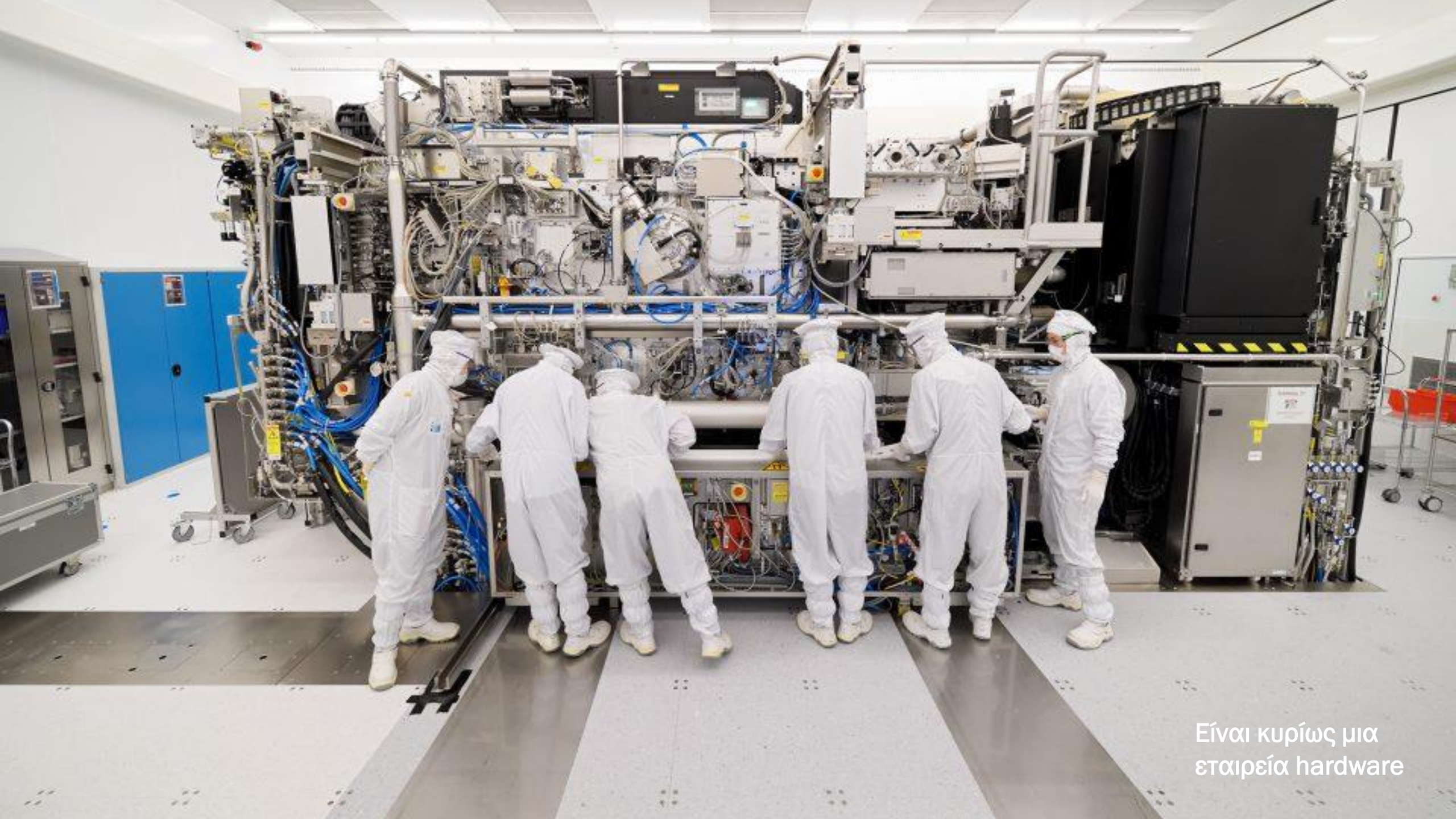
Περισσότεροι από 12000 εργαζόμενοι
>22000 παγκοσμίως



>100 εθνικότητες



Επίπεδη ιεραρχία με έμφαση
στην ομάδα



Είναι κυρίως μια
εταιρεία hardware

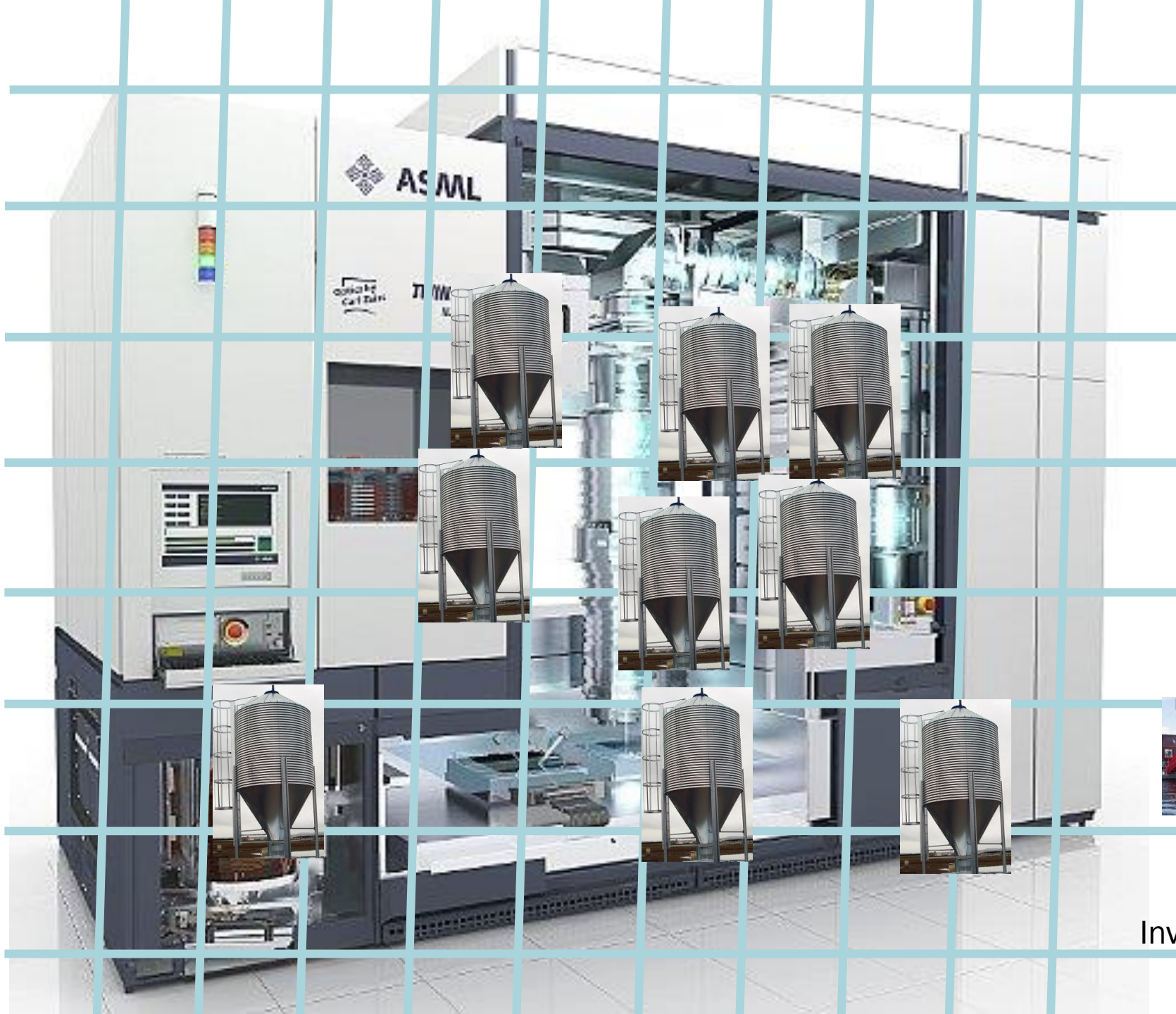


Φωτολιθογραφία



Μετρολογία





System engineering
System performance
Investigations/Improvements

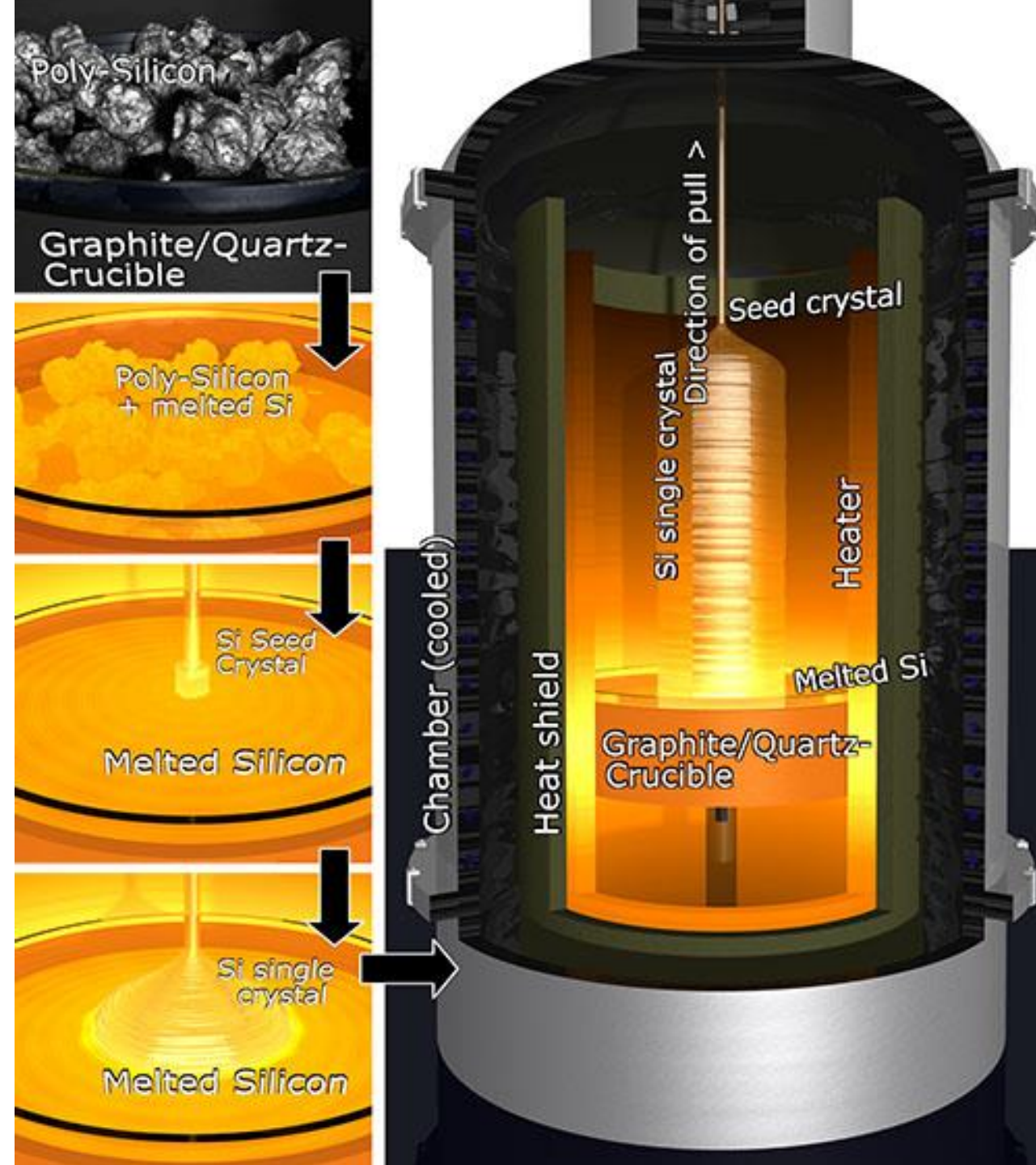


**Πώς παράγονται τα
microchips;**



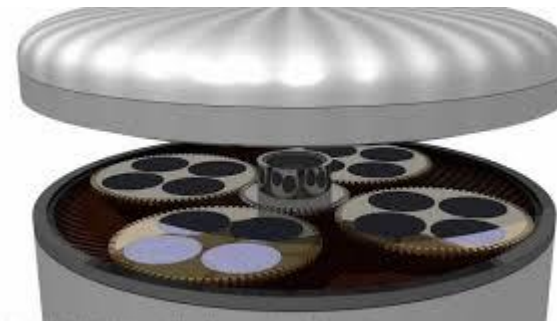
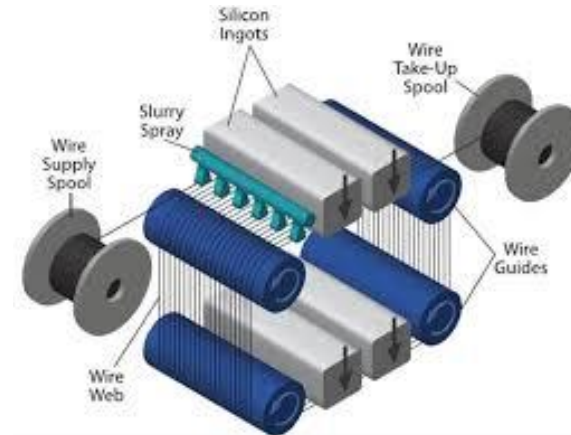
Η πρώτη ύλη

- Συνήθως με την μέθοδο Czochralski, ξεκινάμε από άμορφη poly-silicon και με μια διαδικασία τήξης «αναπτύσσουμε» έναν κύλινδρο διαμέτρου ~30cm και μήκους ~2 μέτρων
- Ο κύλινδρος σιλικόνης που προκύπτει αποτελείται από ένα μόνο κρύσταλλο



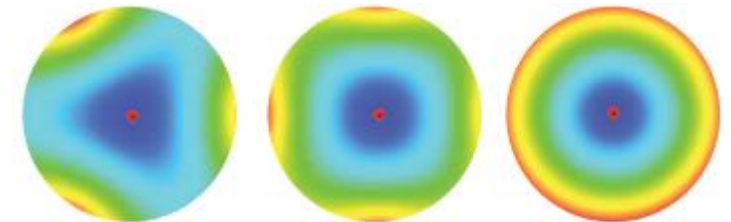
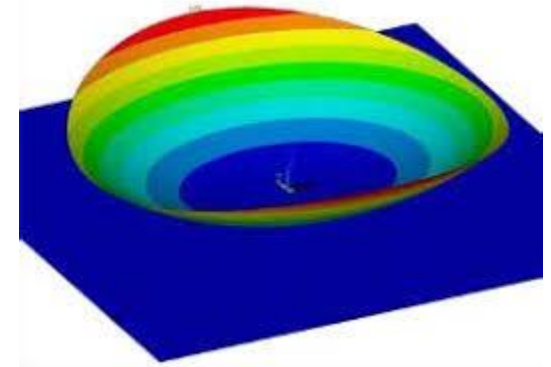
Η κοπή των wafers

- Κοπή του silicon ingot σε bricks
- Μηχανισμός κοπής ενός brick σε δίσκους πάχους ~5mm με λεπτά παράλληλα σύρματα
- Αργή διαδικασία ώστε να μην αυξηθεί η θερμοκρασία λόγω τριβής
- Κατόπιν γυαλίζονται και προκύπτουν wafers συγκεκριμένου πλάτους (~3mm) και προδιαγραφών



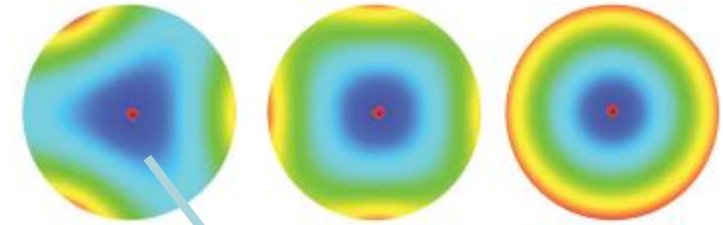
Πρώτη ευκαιρία για Data Science

- «Όλα τα wafers είναι ίσα, αλλά κάποια είναι πιο ίσα»
- Οι κατασκευαστές microchips, θέτουν αυστηρές προδιαγραφές για τα bare silicon wafers
- Οι κατασκευαστές εξοπλισμού υιοθετούν παρόμοιες προδιαγραφές για την πιστοποίηση / παρακολούθησή τους (equipment qualification tests)



Πρώτη ευκαιρία για Data Science

- Η εταιρεία αγοράζει >100000 wafers/χρόνο για να μετρήσει την ονομαστική απόδοση των μηχανών της και βελτιστοποίηση
 - Κανένα chip δεν παράγεται από αυτά
- Πόσο καλά καλύπτουν τον δειγματικό χώρο των πιθανών σχημάτων εκείνα που επιλέγουμε για τα διάφορα tests;
- Ο standard τρόπος χαρακτηρισμού χρησιμοποιεί 10 παραμέτρους (low order)



1000000 σημεία μέτρησης σε κάθε wafer



Κάθε wafer αναπαρίσταται με διάνυσμα ίδιου μεγέθους



Πως μπορούμε να αναγνωρίσουμε παρόμοια σχήματα;

Πρώτη ευκαιρία για Data Science

- Κίνητρο: Για να γίνει αποδεκτός ο εξοπλισμός πρέπει να «περνάει» συγκεκριμένα qualification tests
- Πόσο αντιπροσωπευτικά είναι;
- Μπορούμε να βελτιώσουμε τα tests;

Data Science

Data science combines the scientific method, math and statistics, specialized programming, advanced analytics, AI, and even storytelling to uncover and explain the business insights buried in data.



Ζητάμε να αναγνωρίσουμε στατιστικές ομοιότητες σε παρά πολύ μεγάλες διαστάσεις



Αναγνωρίζουμε / υπολογίζουμε manifolds που επικεντρώνονται στις διαστάσεις που έχουν μεγαλύτερη σημασία



Υπολογίζουμε τις παραμέτρους των πιθανοτικών κατανομών των manifolds

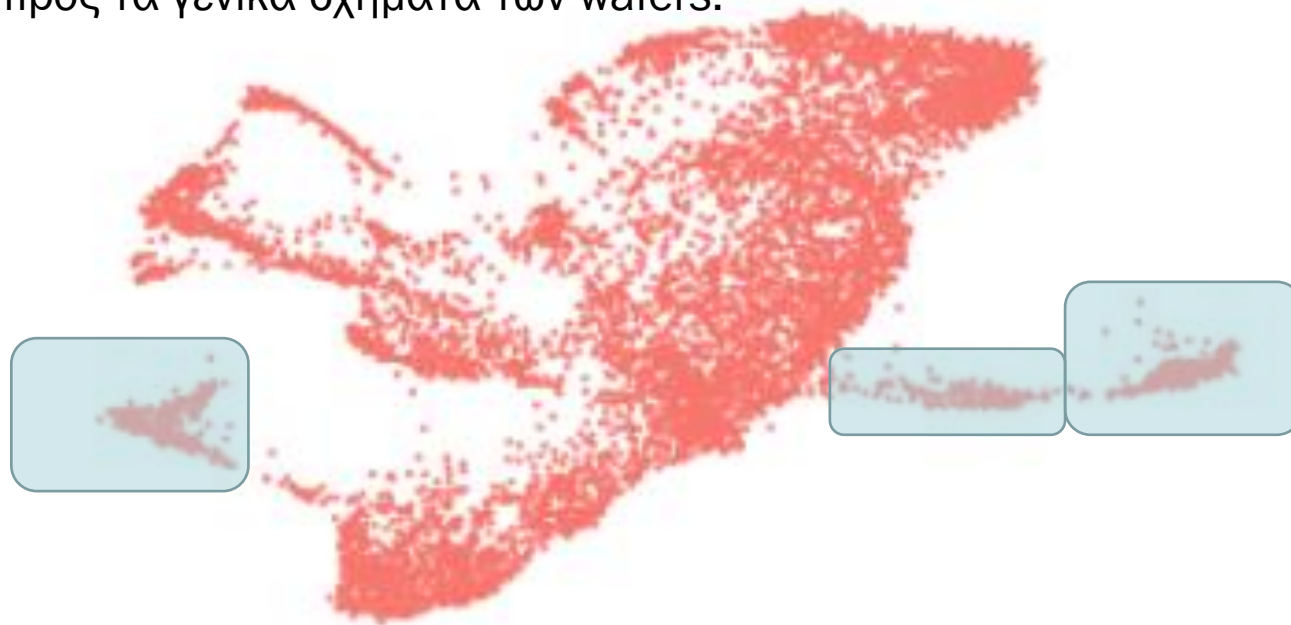


Υπολογίζουμε νέες κατανομές σε έναν χώρο χαμηλής διάστασης που ομοιάζει περισσότερο με τις αρχικές

Πρώτη ευκαιρία για Data Science



Θέτοντας αυστηρές προδιαγραφές ναι μεν ήμασταν συμβατοί με τους πελάτες αλλά και biased ως προς τα γενικά σχήματα των wafers.





Litho-Etch αλληλουχίες



Φωτολιθογραφία:

- Καθορίζει ποιο «σχέδιο» θα χαραχθεί πάνω στα wafers
- «Έξυπνος» εξοπλισμός, γιατί μπορεί να λάβει υπόψη παραμορφώσεις και να τις διορθώσει



Litho-Etch αλληλουχίες



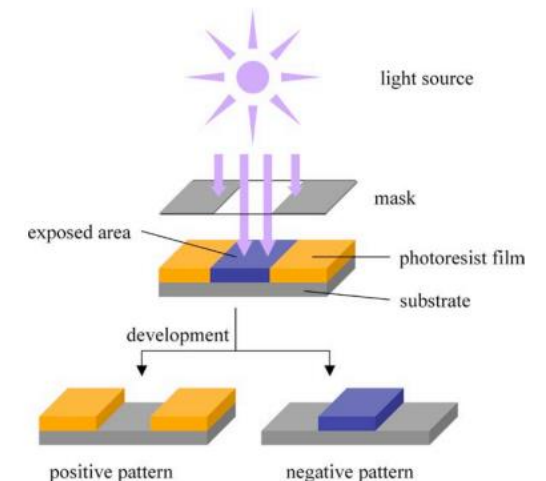
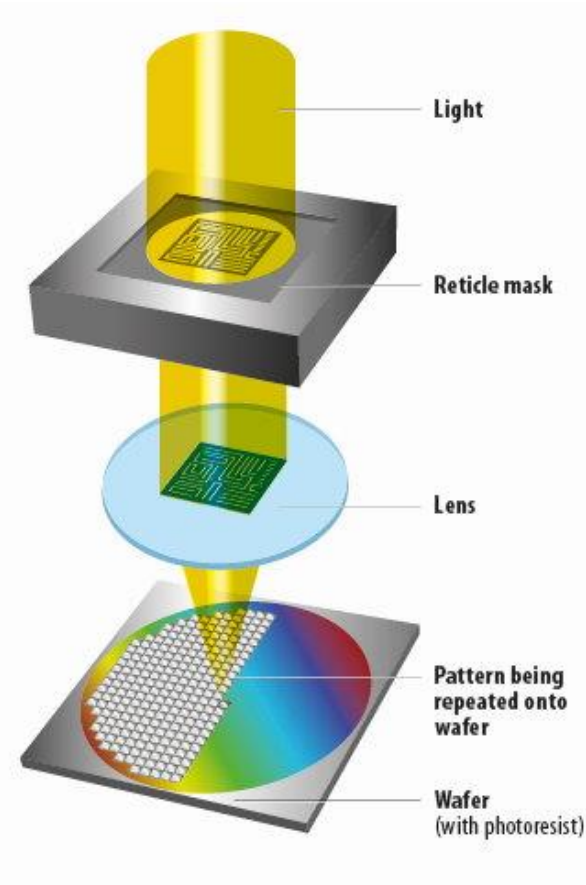
Etching (εγχάραξη):

- Χαράσσει το «σχέδιο» αφαιρώντας υλικό με εξαιρετική ακρίβεια



Βασικά περί φωτολιθογραφίας

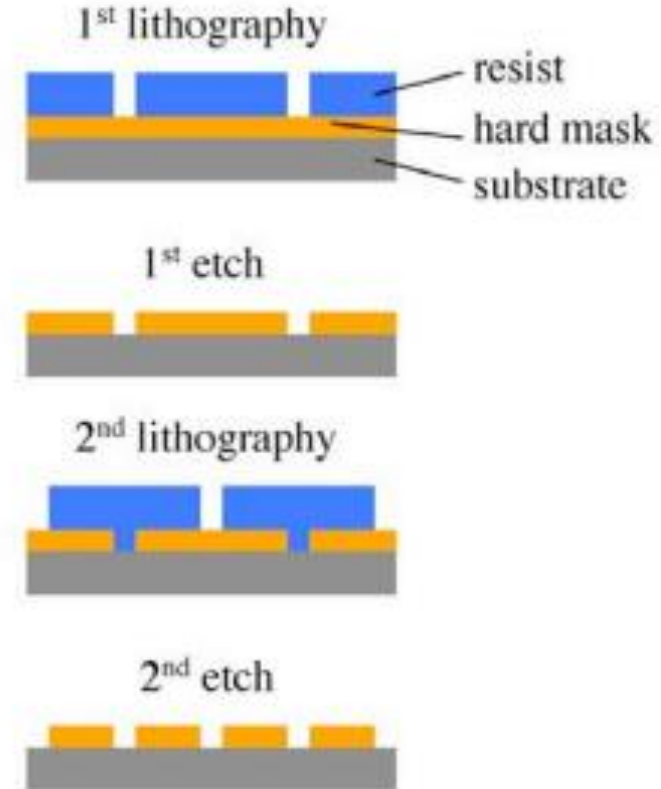
- Κατασκευάζουμε με SW εργαλεία την δομή που θα πρέπει να αποτυπωθεί στην επιφάνεια του wafer και την μετατρέπουμε σε ένα μικρό κρύσταλλο που επιστρώνεται με νικέλιο
- Στα σημεία που έχουν νικέλιο, το φως δεν περνάει, ενώ εκεί που υπάρχει μόνο κρύσταλλος δεν εμποδίζεται
- Στα σημεία που το φως περνάει, αλλάζει τοπικά τις ιδιότητες ενός λεπτού film (resist)
- Αποτέλεσμα, η αρχική δομή να «αντιγράφεται» (με 16 φορές σμίκρυνση) στην επάνω επιφάνεια του wafer



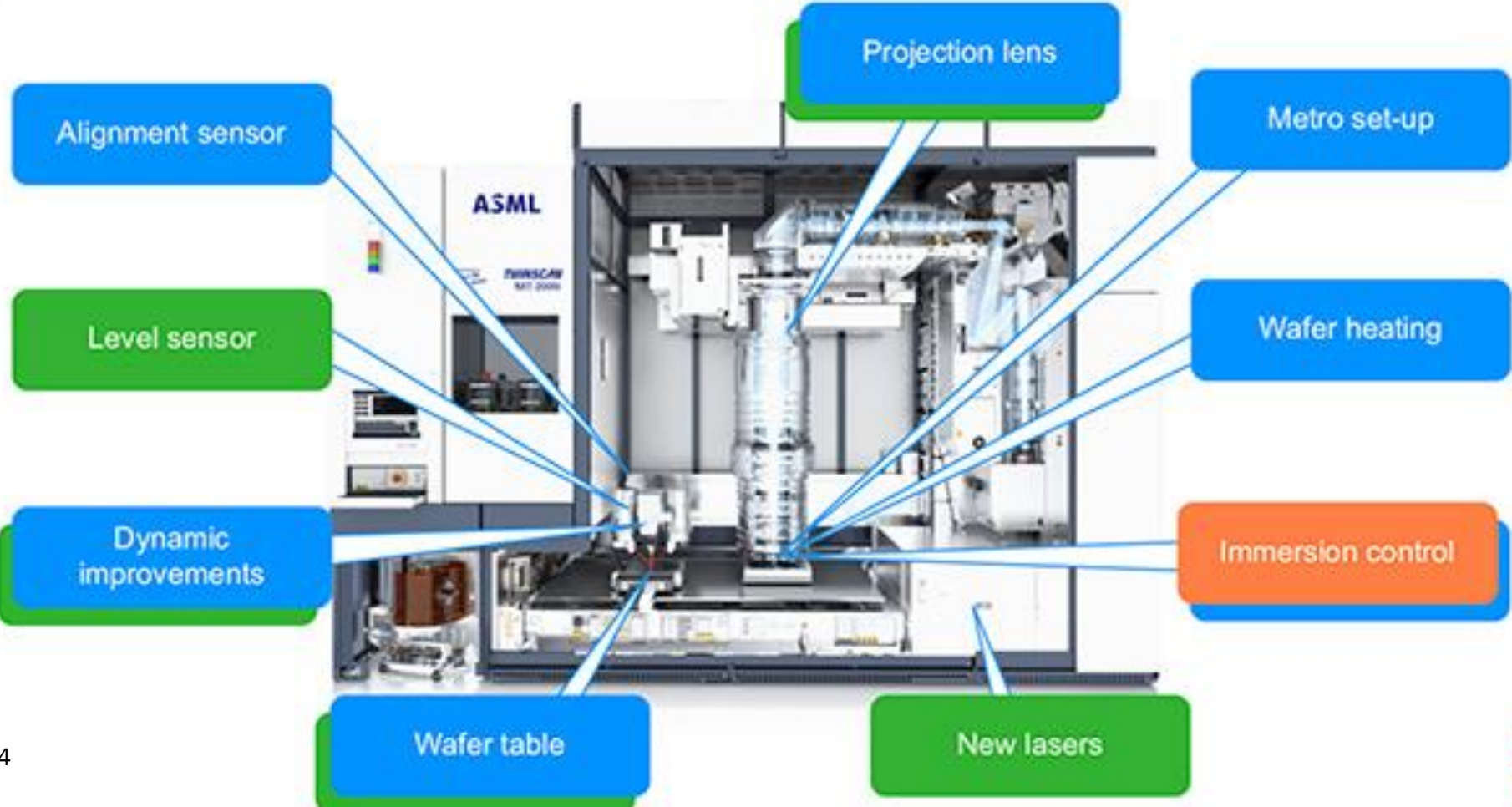
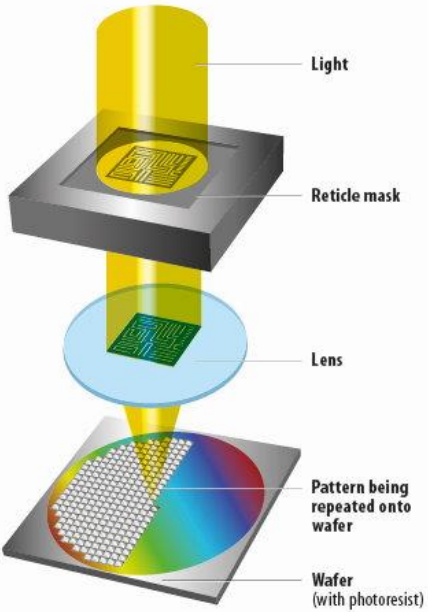


Litho-Etch αλληλουχίες

- Το ανθεκτικό υλικό (του επεξεργασμένου resist) αποτελεί τον οδηγό όπου μπορούμε στοχευμένα να αφαιρέσουμε υλικό



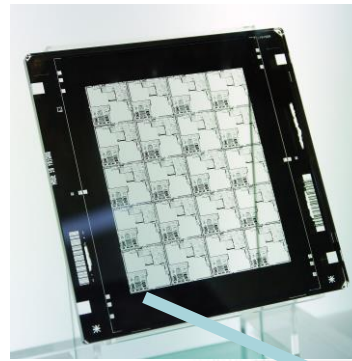
Φωτολιθογραφία



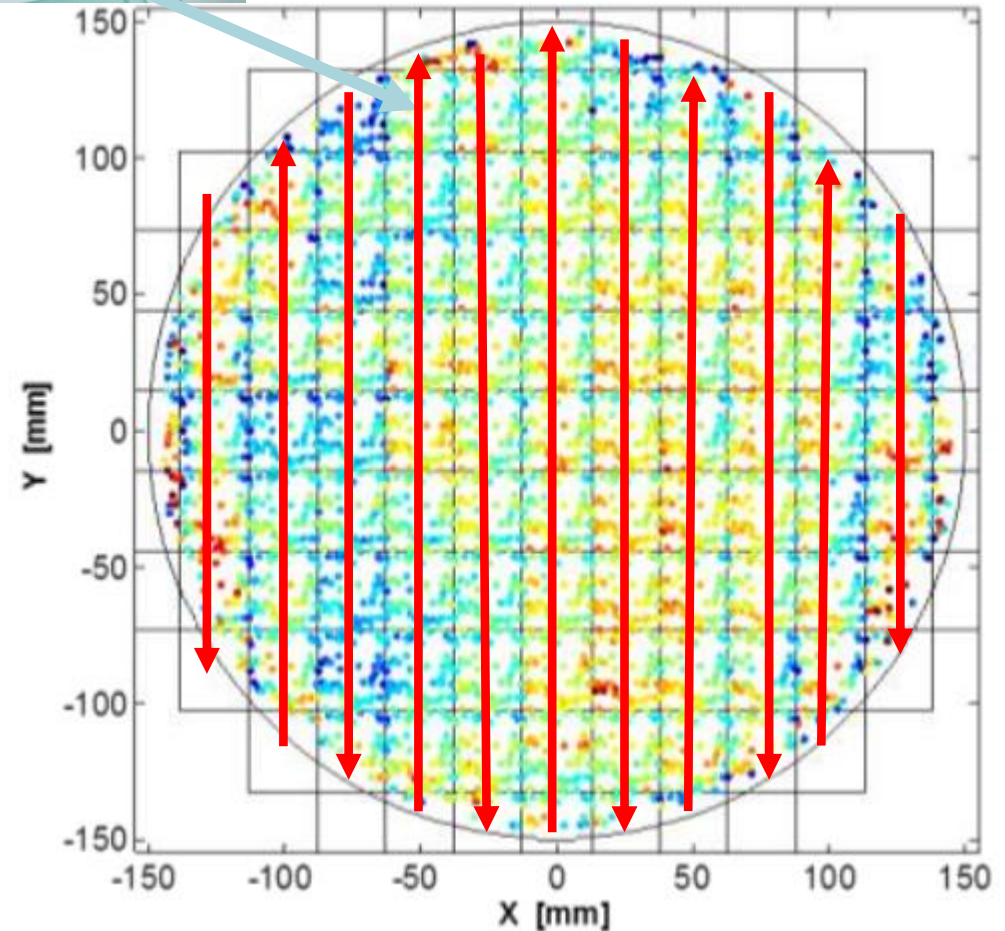
Legend:

- Imaging
- Overlay
- Defectivity

Φωτολιθογραφία



- Στην αριστερή πλευρά μια ρομποτική πλατφόρμα πραγματοποιεί μετρήσεις πχ θέση του wafer στο xy επίπεδο, ανισότητες στην επιφάνεια κ.α.
- Στην δεξιά πλευρά μια δεύτερη ρομποτική πλατφόρμα αντιγράφει slit-by-slit το σχέδιο του reticle
- Για ένα device (πχ cpu, memory) απαιτούνται πολλά reticles
- Ένα reticle συνήθως περιέχει πολλά devices

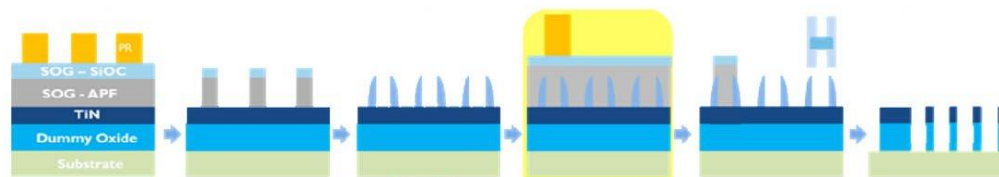
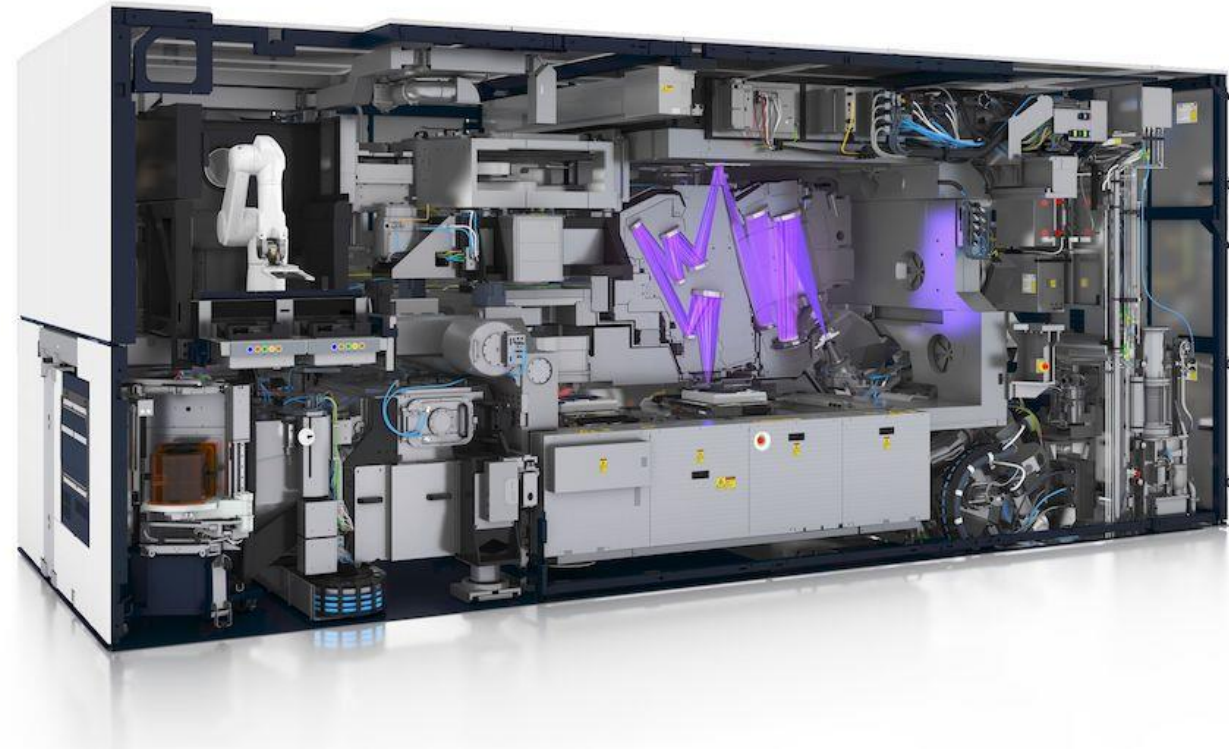



Φωτολιθογραφία

EUV

Δυσκολίες / προκλήσεις

- Παρόλο που κατασκευάζουμε πολυδιάστατες δομές, τα πιο απαιτητικά βήματα είναι κατά τα πρώτα layers
 - Στα logic, DRAM fabs εκεί κατασκευάζονται οι μικρότερες δομές των transistors
- Καλούνται και μηχανές που «τυπώνουν χρήματα», για αυτό πρέπει να είναι παραγωγικές συνέχεια
- Πολλά από τα προηγούμενα litho-etch βήματα είναι απαραίτητα μόνο για σμίκρυνση των δομών

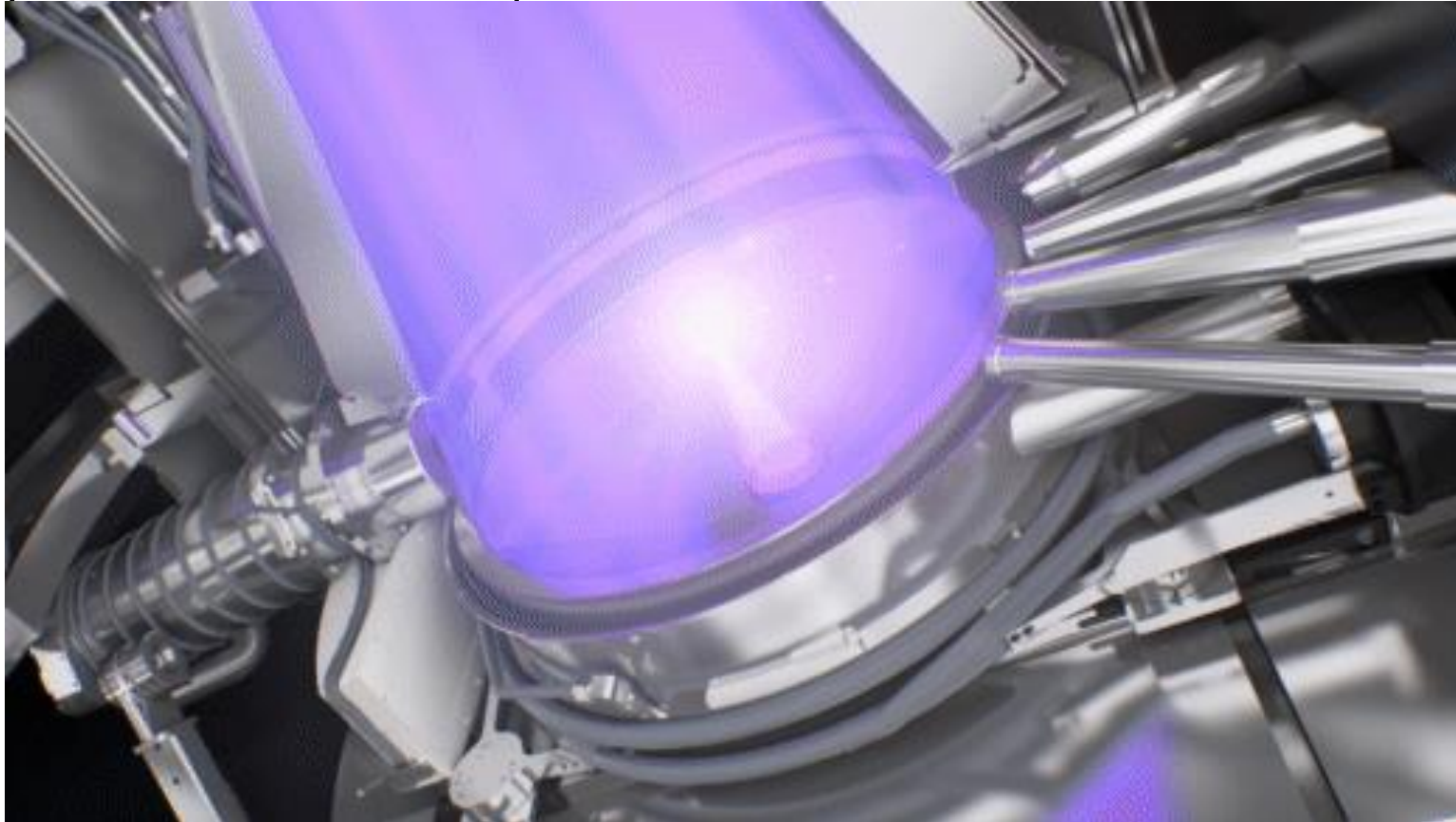




Use case:
**ο ρόλος της συλλογής
πολλών δεδομένων και οι
κατάλληλες ερωτήσεις**

Πώς η ευρεία καταγραφή δεδομένων και η μοντελοποίησή τους μπορεί να λύσουν προβλήματα σχεδιασμού

- Τεράστιο τεχνολογικό άλμα από τα 193nm μήκος κύματος στα 13nm (από DUV σε EUV)



Πώς η ευρεία καταγραφή δεδομένων και η μοντελοποίηση τους μπορεί να λύσουν προβλήματα σχεδιασμού

- Πρόβλημα: ο συλλέκτης EUV ακτινοβολίας είναι σχεδιασμένος να διαρκεί 1 χρόνο, αλλά στην πράξη κρατούσε μόνο 1.5 εβδομάδες
- Προσέγγιση: συγκέντρωση όλων των δεδομένων που καταγράφονται, χωρίς καμία εξαίρεση
- 3000+ αισθητήρες και καταγραφείς (κάποιοι 50KHz, άλλοι Hz)
- Περισσότερα από 30TB δεδομένα ανά βάρδια πειραματισμών
- Ιδιωτικό HPC με αποκλειστική χρήση 5000 cores για data engineering/ingestion

Πώς η ευρεία καταγραφή δεδομένων και η μοντελοποίηση τους μπορεί να λύσουν προβλήματα σχεδιασμού

- Μοντελοποίηση: των rare events σε πιθανές περιόδους χαμηλής διασποράς υπολοίπων
- Στόχος η εύρεση predictive correlation: αν υπάρχουν σήματα που μπορούν να προβλέψουν την καλή/κακή συμπεριφορά (σε δεδομένα που δεν έχουμε ξαναδεί) από πολλαπλά test-rigs
- Μέθοδος μοντελοποίησης: καθαρά machine learning
- Εύρεση του αιτίου: μέσω «συζήτησης με του ειδικούς» των πιθανών στατιστικών ευρημάτων



Πώς η ευρεία καταγραφή δεδομένων και η μοντελοποίηση τους μπορεί να λύσουν προβλήματα σχεδιασμού

- Αποτέλεσμα: από τις καταγραφές 30 ημερών (90 βάρδιες) βρέθηκε περίοδος within-spec-contamination κάποιων λεπτών
Η περίοδος αυτή μοντελοποιήθηκε και το μοντέλο έδειξε πως η προηγηθείσα παρουσία από ίχνη αερίων καύσης ήταν η διαφορά στις καταγραφές
- Μια προβληματική βαλβίδα κενού προστάτευε το σύστημα!!!!
- Μόνο με την data driven προσέγγιση έγινε ορατό




+



+

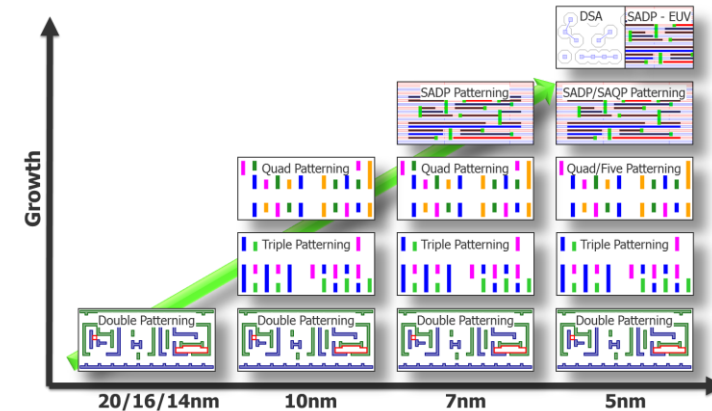




**Use case:
Εντοπισμός του
καταλλήλου προβλήματος
και ο μετασχηματισμός
σε machine learning
μορφή**

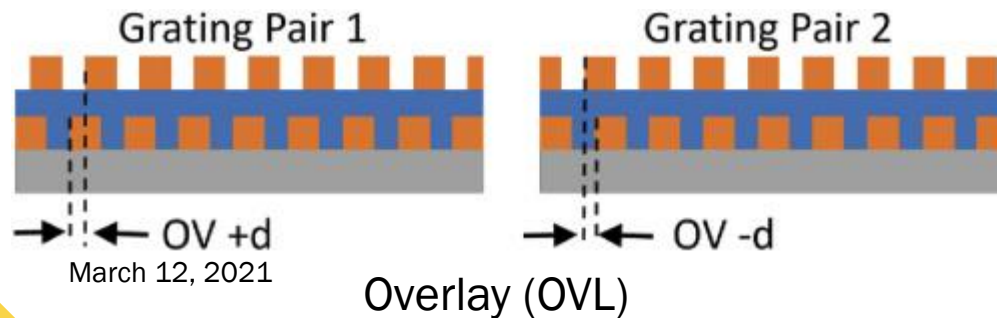
Η Υγρή-Φωτολιθογραφία

- Τα microchips κατασκευάζονται επίπεδο-επίπεδο και εμπλέκονται εκατοντάδες βήματα επεξεργασίας
- Τα πρώτα litho-layers είναι τα πιο κρίσιμα γιατί περιέχουν τις δομές με τις μικρότερες διαστάσεις
- Σήμερα, η πλειονότητα των κρίσιμων επιπέδων «κατασκευάζονται» με υγρή-φωτολιθογραφία και πολλαπλά «περάσματα»

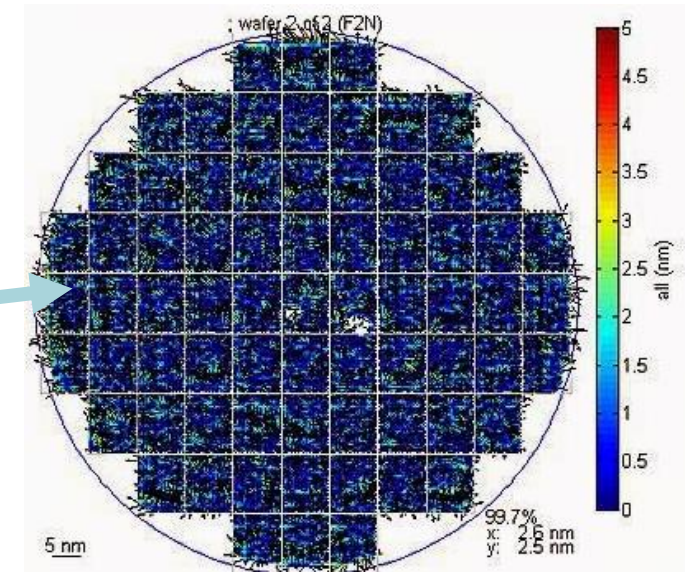
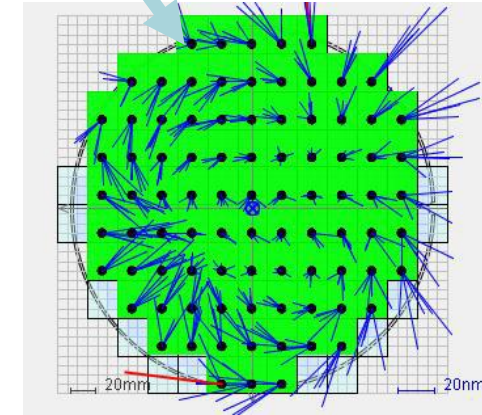
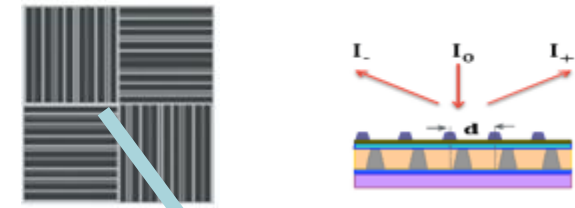


Συνεχής παρακολούθηση της παραγωγής

- Για να μεταβεί η παραγωγή από research σε High Volume Manufacturing (HVM) πρέπει να έχει υψηλό ποσοστό λειτουργικών τελικών συσκευών
- Ένα τυπικό wafer για ένα ολοκληρωθεί χρειάζεται περίπου 2-μήνες επεξεργασία στο εργοστάσιο
- Δεν περιμένουν το electrical-test για να δουν αν λειτουργεί σωστά οι συσκευές
- Ελέγχουν σε κάθε βήμα metrology KPIs (πχ wafer align, overlay) και όταν χρειάζεται αφαιρούν το resist και ξανα-εκθετούν (rework)

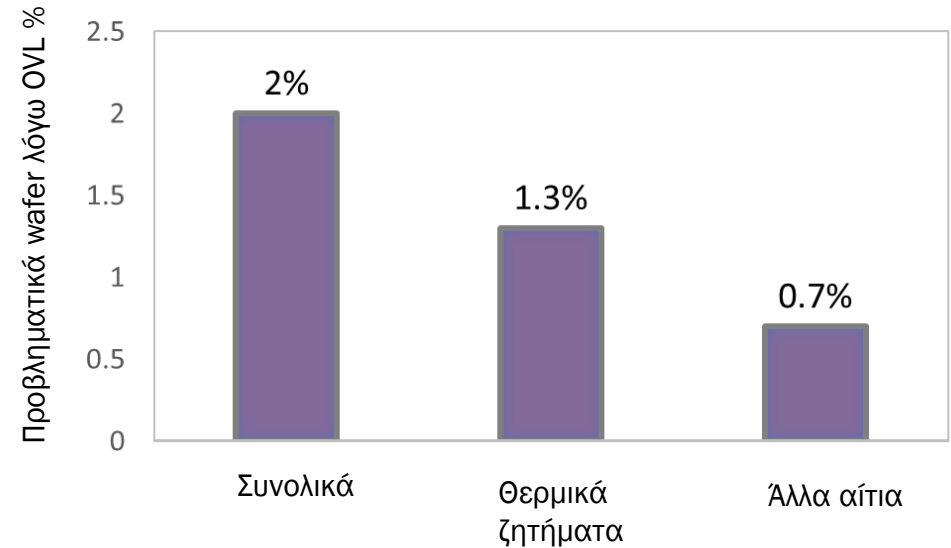
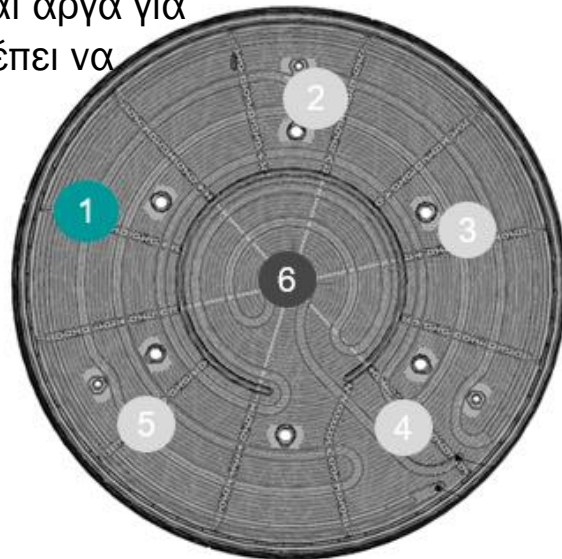


Overlay

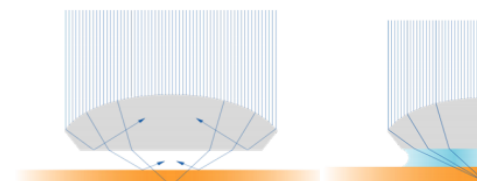


Το πρόβλημα της θερμικής διαταραχής κατά την πρώτη έκθεση (zero-layer)

- **Πρόβλημα:** Αν ένα bare-silicon wafer (ως προς το stack) έχει παραμορφώσεις λόγω θερμικής ανομοιομορφία την στιγμή που «αγκυρώνεται» στο ρομποτικό βραχίονα (στο wafer table), θα αποκτήσει παραμορφωμένα WA marks και θα το αντιληφθούμε όταν έχουμε ήδη επεξεργαστεί τα κρίσιμα layers
- Όταν το αντιληφθούμε θα είναι αργά για διόρθωση και συνεπώς θα πρέπει να «καταστραφεί»



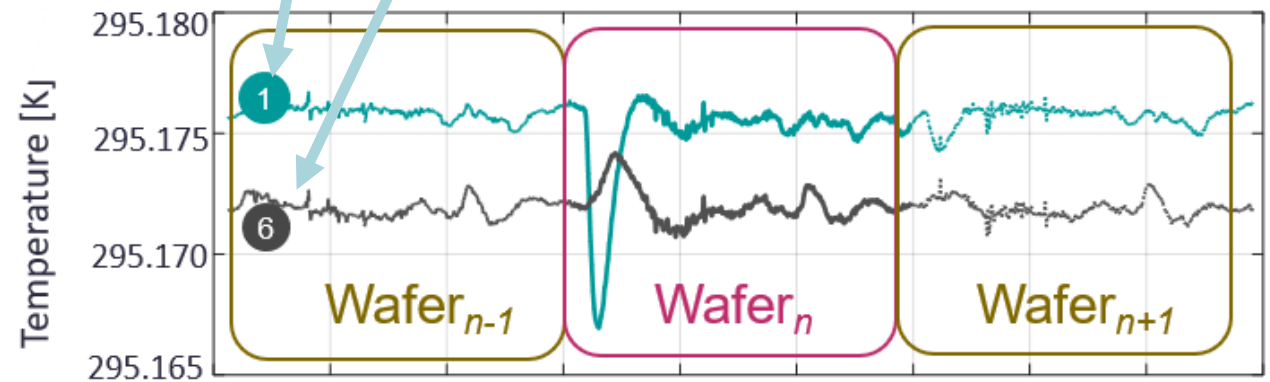
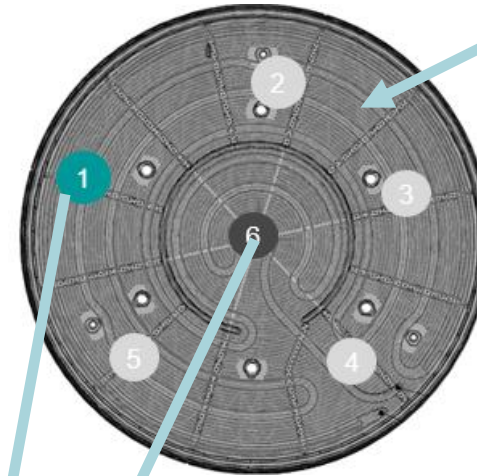
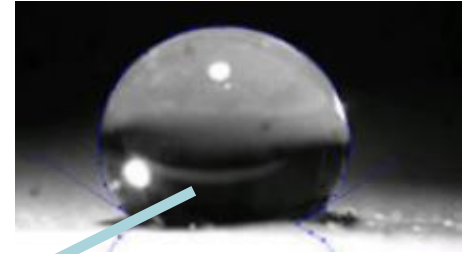
Για ένα τυπικό HVM scanner
1,000,000 w/χρόνο → ~13,000 απώλεια → μείωση στα 1,500



**Find a problem
and solve it.**

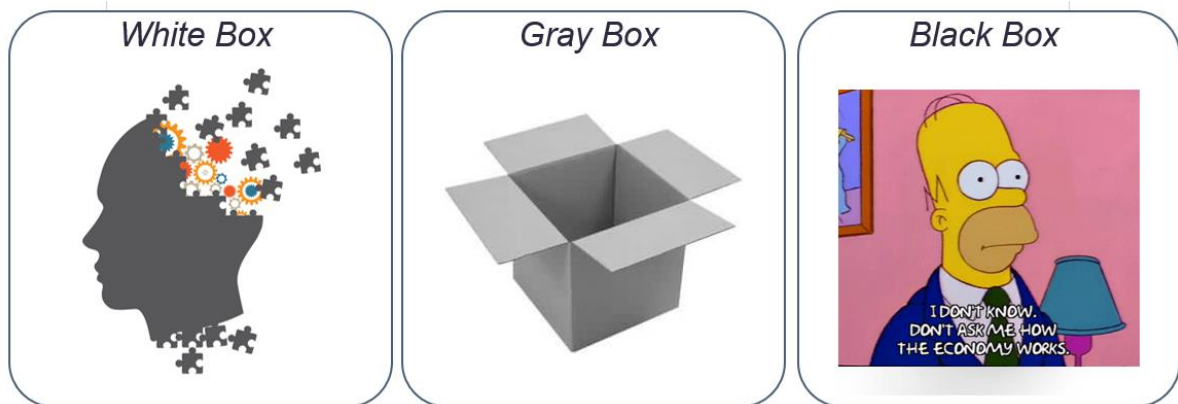
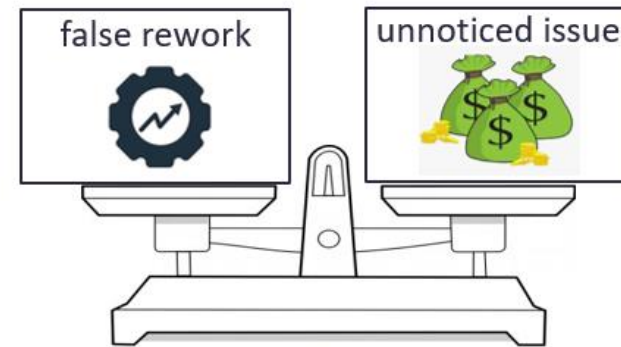
Το πρόβλημα της θερμικής διαταραχής κατά την πρώτη έκθεση (zero-layer)

- **Φυσική:** Η ύπαρξη και εξάτμιση πολύ μικρών σταγονιδίων νερού, δημιουργούν μεταβολές στην θερμοκρασία και την παραμόρφωση των wafers
- Δεν είναι όμως όλες οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας προβληματικές
- Οι θερμομετρητές αυτοί αξιοποιούνται μόνο κατά την διενέργεια δοκιμών του εξοπλισμού

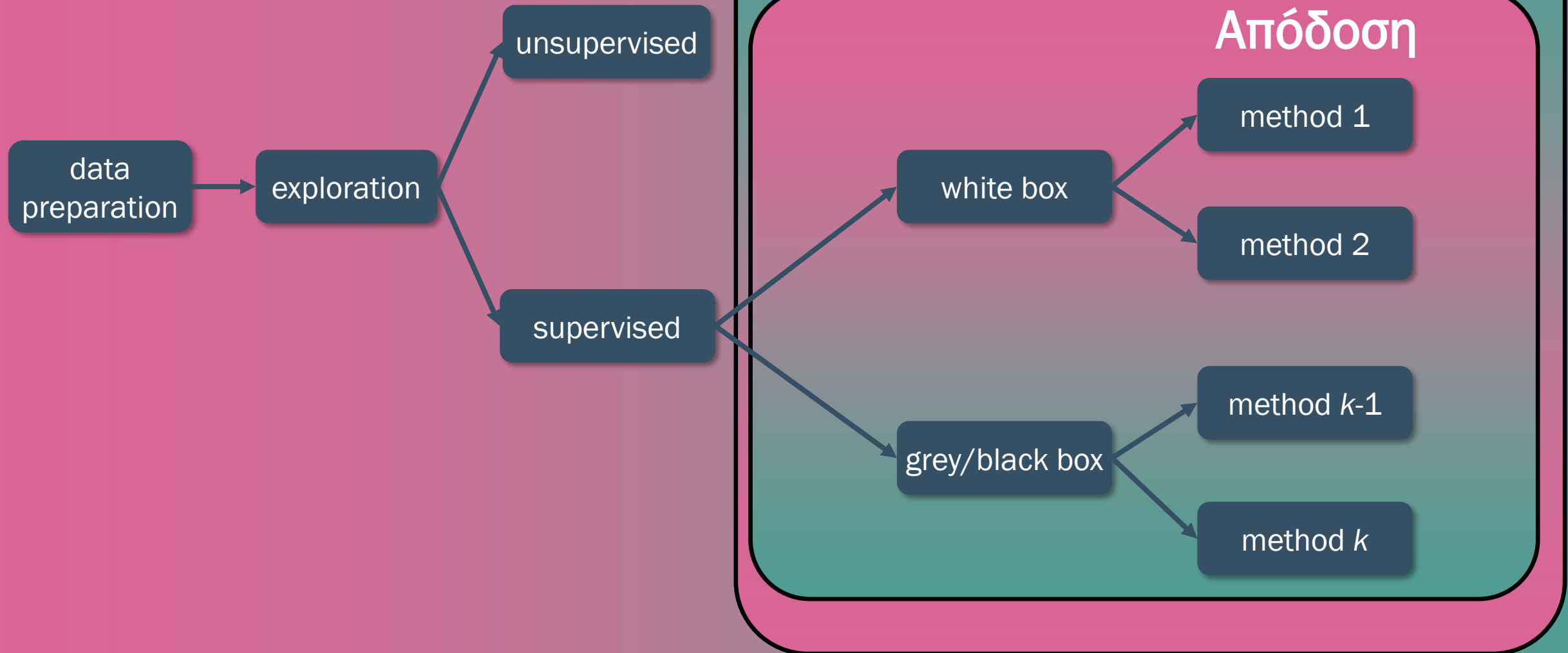


Οι δυσκολίες της μοντελοποίησης

- Ο Μετασχηματισμός του προβλήματος σε πρόβλημα machine learning έχει προκλήσεις
 - Έντονη ανισορροπία των κλάσεων
 - Πολύ λίγα δεδομένα
 - Η όλη διαδικασία μοντελοποίησης πρέπει να μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε το πρόβλημα και βελτιώσουμε μελλοντικά designs

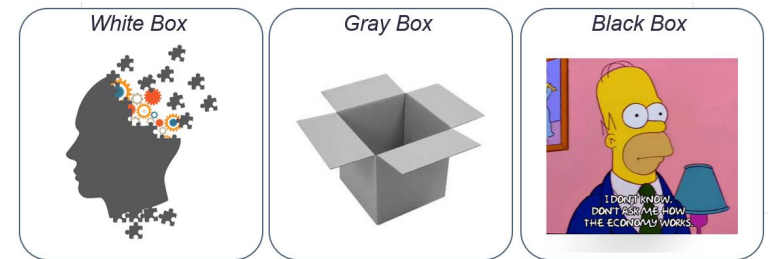
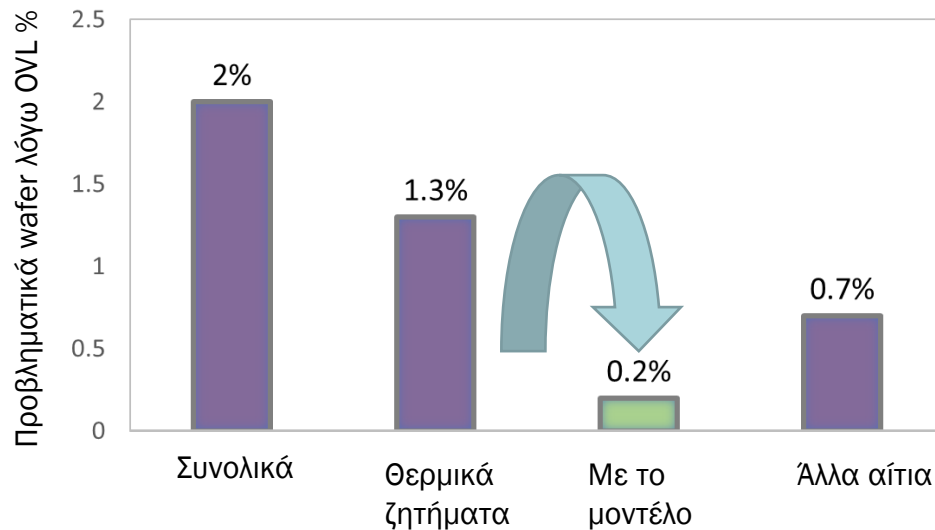


Αξία




Το πρόβλημα της θερμικής διαταραχής της πρώτης έκθεσης (zero-layer)

- Σχεδόν εξάλειψη των προβληματικών θερμικά wafers



Το 90% των προβλημάτων προέρχεται από διαφορά -1mK σε έναν συγκεκριμένο τομέα στην περίμετρο

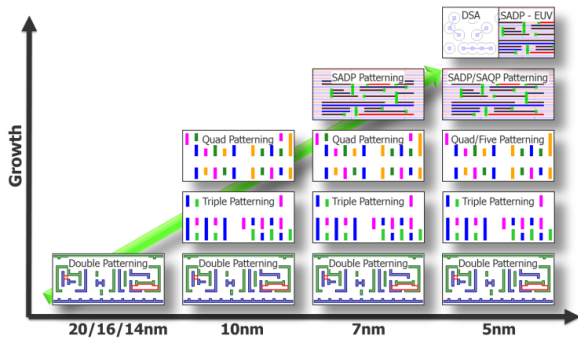
Καλύτερη θερμική διαχείριση του τομέα αυτού σε μελλοντικό σχεδιασμό



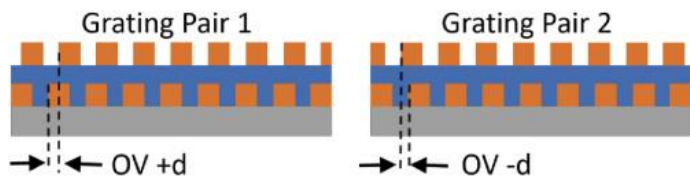
**Use case:
Αποκαθιστώντας την
εμπιστοσύνη των
πελατών μέσω της
χρήσης στατιστικών
τεχνικών σε προβλήματα
οπτικής**

Οπτική ευθυγράμμιση του wafer: ο ακρογωνιαίος λίθος της μετρολογίας

Αναγκαιότητα
πολλαπλών περασμάτων



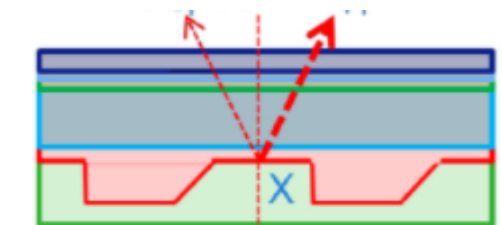
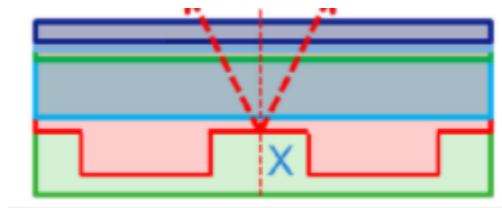
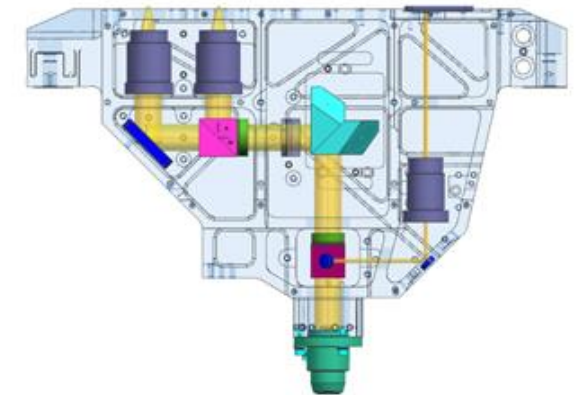
Οι προδιαγραφές του
overlay εξαιρετικά χαμηλές



Ευθυγράμμιση με βάση ένα
σύνολο σημείων αναφοράς

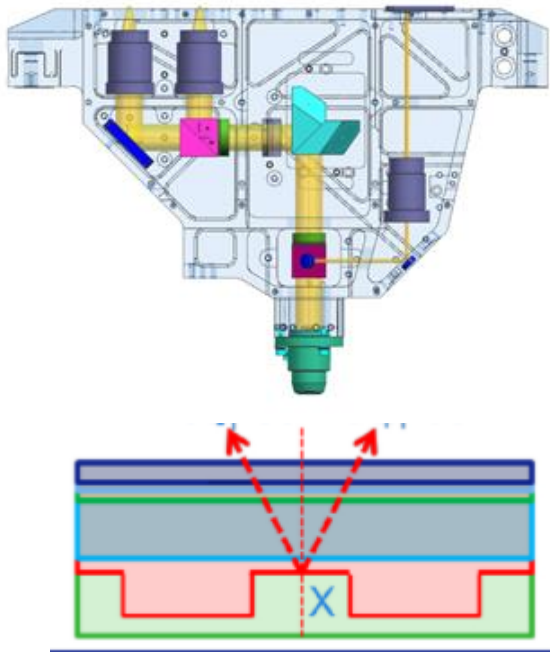


Αισθητήρας ανάγνωσης
wafer align marks



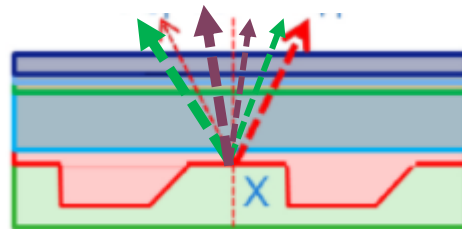
Οπτική ευθυγράμμιση του wafer: ο ακρογωνιαίος λίθος της μετρολογίας

Αισθητήρας ανάγνωσης
wafer align marks



Ταχύτατη και ταυτόχρονη μέτρηση
της ανάκλασης από 4 έως 12 μήκη
κύματος

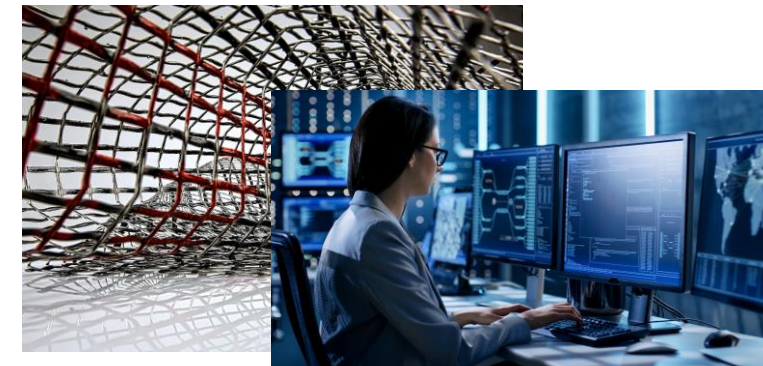
Λόγω της παραμόρφωσης των
αυλακώσεων και της
επίδρασης των επιστρώσεων
η ανάκλαση διαφέρει στα
μήκη κύματος



Πρόβλημα: ποια ανάκλαση
δηλώνει την σωστή μετατόπιση;

Με βάση την εμπειρία και την οπτική
θεωρία, και λαμβάνοντας υπόψη
περιορισμούς της παραγωγής:
Βέλτιστη επιλογή βάσει γραμμικού
συνδυασμού όλων των μηκών κύματος,
με τους περιορισμούς:

- Οι παράμετροι αθροίζουν στο 1
- Η βαρύτητα κάθε μήκους κύματος ανήκει στο $[-2,2]$ με έξτρα ποινή όσο πλησιάζουμε τα άκρα



Οπτική ευθυγράμμιση του wafer: ο ακρογωνιαίος λίθος της μετρολογίας

- Η εύρεση των παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου γίνεται με βάσει τις μετρήσεις
- Τρόπος υπολογισμού:
 - Μέτρηση <12 wafers ως προς τα WA marks και έκθεσή τους και μέτρηση του overlay
 - Για τα wafers αυτά υπολογίζουμε τις παραμέτρους των επιπέδων μετατοπίσεων (HOWA, High Order WA), οπότε κάθε wafer περιγράφεται από 24 παραμέτρους ενός σταθερού/κοινού πλέγματος
 - Λύνουμε το γραμμικό σύστημα:
$$p_1 * C_1 + p_2 * C_2 + \dots + p_{12} * C_{12} = OVL \text{ ή } C * P = OVL$$
λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς



Δύσκολη ερώτηση από τους πελάτες

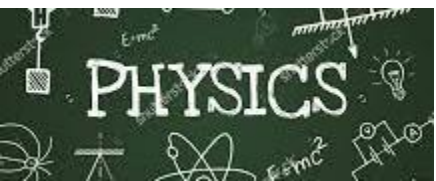
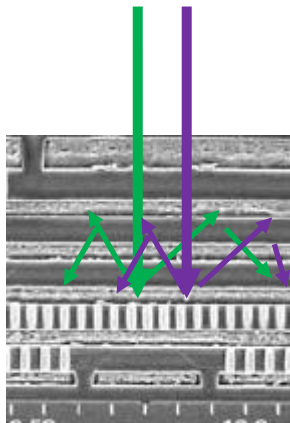
Οι πελάτες στις δοκιμές στην γραμμή παραγωγής τους δήλωσαν:

- Οι μηχανικοί παραγωγής διαπίστωσαν πως οι συνδυασμοί της βαρύτητας των χρωμάτων ποικίλουν πολύ για μικρές αλλαγές στα calibration wafers. Γιατί συμβαίνει κάτι τέτοιο; Τι σημαίνει;



Ψάχνοντας τις απαντήσεις

Φυσική



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ

$$C * P = OVL, \sum P = 1, -2 < P_i < 2$$



$$C' * P' = OVL', -2 < P_i < 2$$

$[C'=C[:,1:end-1]-C[:,end], OVL'=OVL-C[:,end]]$



$$OVL'_i \sim Normal(\mu_i, \sigma)$$

$$\mu_i = P'_1 * C'_{i,1} + \dots + P'_{k-1} * C'_{i,k-1}$$

$$P'_1 \sim Normal(0, 2/3)$$

⋮

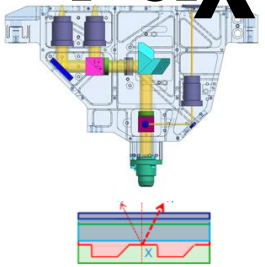
$$P'_{k-1} \sim Normal(0, 2/3)$$

$$\sigma \sim Uniform(0, Const)$$

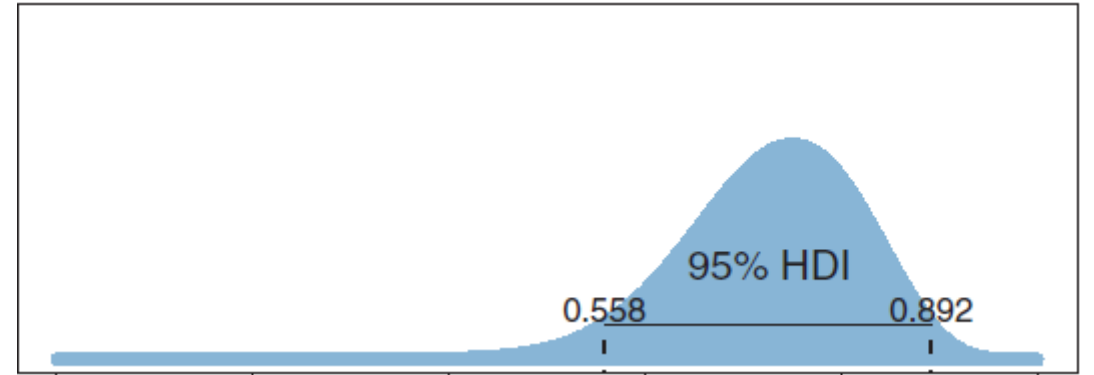
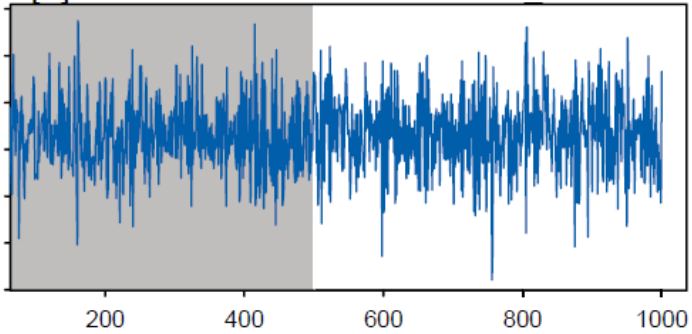
$$P'_1, \dots, P'_{k-1} \in [-2, 2]$$



Ψάχνοντας τις απαντήσεις

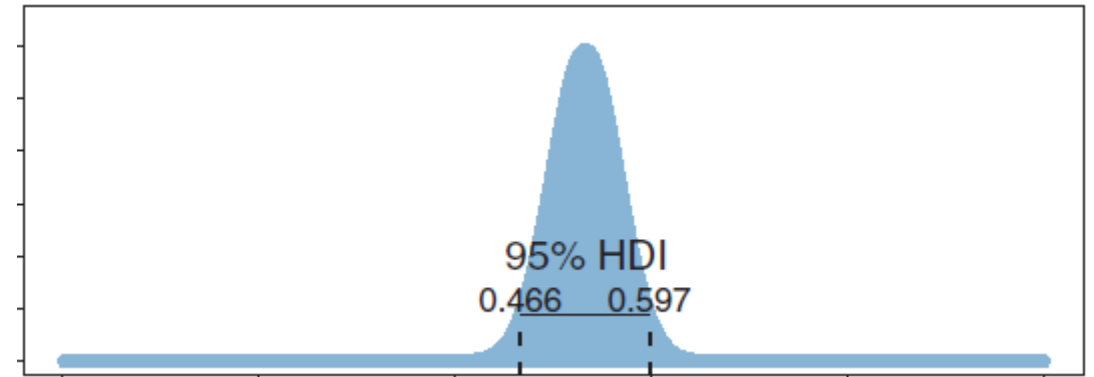
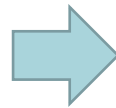
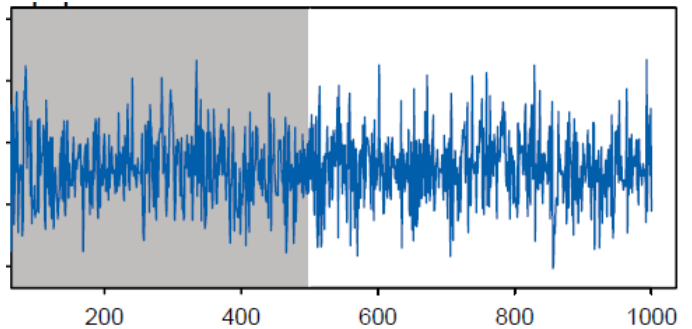


P'_1



⋮

σ



Ψάχνοντας τις απαντήσεις

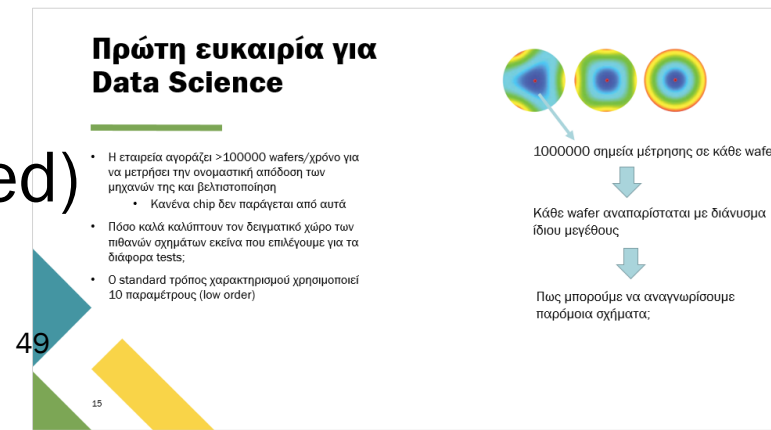
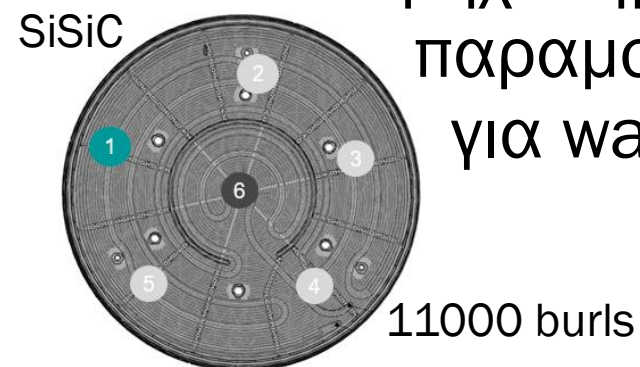
- Η απάντηση: Οι συνδυασμοί της βαρύτητας του κάθε μήκους κύματος που υπολογίζαμε με την επίλυση του γραμμικού συστήματος (μαζί με τους περιορισμούς) σύμφωνα με το οπτικό μοντέλο είναι απλά το σημείο της μέγιστης posterior probability της συγκεκριμένης παραμέτρου.
- Η μεγάλη διακύμανση, σε μικρές αλλαγές των δεδομένων, οφείλεται στο γεγονός ότι η κατανομή των παραμέτρων είναι πλατύκυρτη, πράγμα που οφείλεται στον μικρό αριθμό δεδομένων (λίγα wafers) και τον τύπο της stack που παρουσιάζει διαφοροποιήσεις και συνεπώς περιορισμένη τοπική γραμμικότητα.
- Μετά την ανάλυση αυτή ο αριθμός των wafers αποφασίζεται με βάση την διασπορά της κατανομής
- Επίσης επειδή παρατηρήθηκε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι κατανομές παρουσιάζουν έντονη ασυμμετρία με μικρή διασπορά, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι οι περιορισμοί εύρους είναι κυρίαρχοι και συνεπώς πιθανή ένδειξη προβλήματος στον αισθητήρα



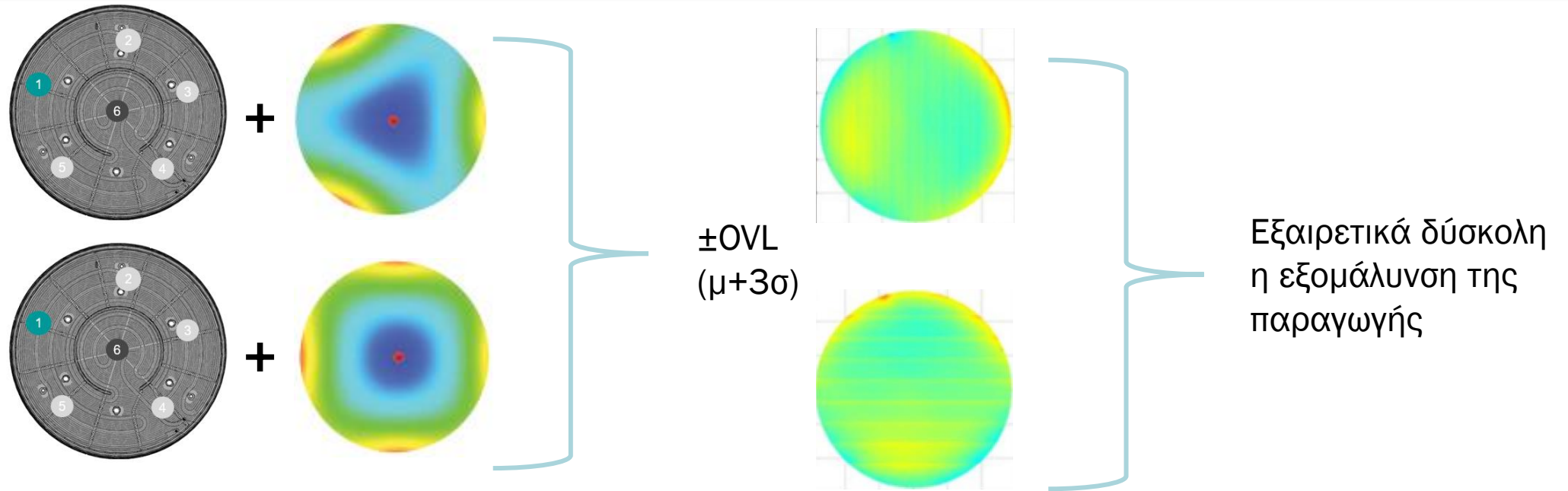
**Use case:
Προσθέτοντας τον χαμένο
σύνδεσμο στην
μετρολογία**

Προσθέτοντας τον χαμένο σύνδεσμο στην μετρολογία

- Είδαμε πως τα wafers ακόμη και χωρίς επεξεργασία έχουν μη-επίπεδο σχήμα με high-order περιεχόμενο (free form wafer shape)
- Τα wafer tables λόγω των εκατομμυρίων wafers που εξυπηρετούν προκαλούν παραμορφώσεις λόγω τριβής που εντείνονται όταν τα σχήματα των wafers διαφέρουν στην ίδια παρτίδα (Lot)
- Τα μηχανήματα φωτολιθογραφίας μετράνε παραμορφώσεις xy και z αξόνων μόνο για wafers που είναι «αγκυρωμένα» (clamped)



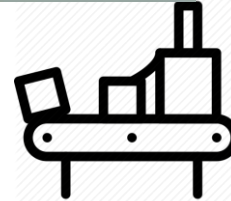
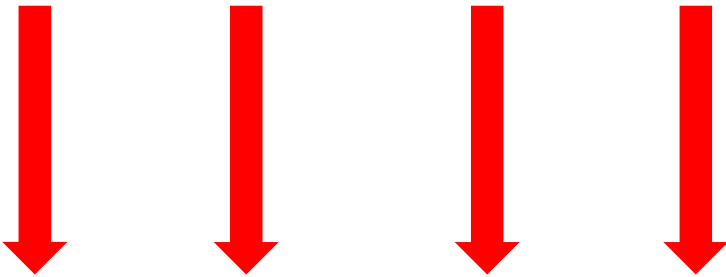
Προσθέτοντας τον χαμένο σύνδεσμο στην μετρολογία



Αν μπορούσαμε να αξιοποιήσουμε το σχήμα στον φωτολιθογραφικό εξοπλισμό, τότε μπορούμε να το διορθώσουμε κατά την διάρκεια έκθεσης!



Προσθέτοντας τον χαμένο σύνδεσμο στην μετρολογία



Από την μελέτη των σχημάτων των wafers



Συνδυασμός με την κατάσταση των wafer tables (ως υλικό)

Πρόταση λύσης που λύνει ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα.

Τι με έχει διδάξει η εμπειρία στην βιομηχανία

- Τα πάντα ξεκινάνε από τα δεδομένα
 - Από την πρώτη στιγμή αντιμετώπιζα την απουσία τους ως μέρος της εργασίας μου: έκανα τις κατάλληλες επαφές για να δημιουργήσω αξιόπιστα datasets που ανανέωνα για χρόνια
 - Η κατανόηση της φυσικής σημασίας των δεδομένων είναι πάρα πολύ σημαντική
- Τα περισσότερα προβλήματα της βιομηχανίας δεν είναι σε μορφή φιλική για machine learning
 - Ήταν δική μου αρμοδιότητα να βρω τα προβλήματα αυτά και να τα διατυπώσω σε ισότιμη/κατάλληλη μορφή
- Καλά αποτελέσματα έρχονται μόνο μετά από συνεργασία με τους ειδικούς της περιοχής
 - Παρέχουν την φυσική γνώση ώστε να πάρουμε καλή απόδοση με λιγότερα δεδομένα
- Το data engineering είναι αναγκαιότητα και τα datasets ποτέ σε καθαρή/πλήρη μορφή
- Πάντα ακολουθούσα την αρχή του Skiena: “Design Graphs, Not Algorithms”
- Αν από την αρχή κάποιος έχει αποφασίσει την ακριβή ακολουθία βημάτων ανάλυσης /μοντελοποίησης τότε δεν κάνει πραγματική data driven ανάλυση
- Ο κανόνας είναι 1 επιτυχία στις 5 προσπάθειες, οπότε μοιραζόμαστε τα ενδιάμεσα αποτελέσματα
- Κανένα βήμα της ανάλυσης δεν είναι το τελικό
- Αξιολογούσα μόνο αναλύσεις που βασίζονταν σε reproducible research



“

**"THE ELECTRIC LIGHT
DID NOT COME FROM
THE CONTINUOUS
IMPROVEMENT OF
CANDLES."**

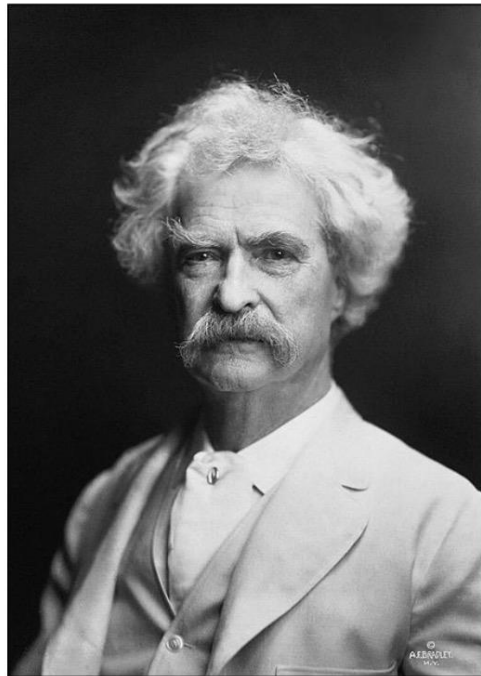
OREN HARARI

PH



**"Essentially, all models are wrong,
but some are useful"**

George E.P. Box



**"Figures don't lie,
but liars figure"**

Samuel Langhorne Clemens
(Mark Twain)

