

Grid-unterstützte E-Beam-Belichtungssimulation

Dr. C. Dürr, A. Singer, M. Sülzle
EQUIcon Software GmbH Jena

Kurzfassung

Bei der Elektronenstrahl-Lithografie, englisch *E-Beam Lithography*, einem Verfahren zur Herstellung mikroelektronischer und mikrooptischer Produkte, spielt unter anderem die Korrektur des sogenannten *Proximity-Effekts* eine große Rolle.

Bei der Entwicklung diesbezüglicher Korrekturverfahren sind Belichtungssimulationen ein entscheidendes Mittel, Entwicklungszeit und -kosten zu sparen.

Die Simulationen sind mitunter sehr leicht parallelisierbar, so dass die Nutzung von Grid-Ressourcen sinnvoll erscheint. Der Beitrag berichtet über einen solchen Ansatz, den wir im Rahmen des Projektes Optimum-Grid [1] verfolgt haben.

1 Elektronenstrahl-Lithografie

Elektronenstrahl-Lithografie ist eine Technologie, bei der mittels eines elektronenoptischen Systems Strukturen auf ein Substrat geschrieben werden können. Das Substrat ist mit einem *Resist* beschichtet, der seine Eigenschaften je nach empfangener Energiedosis ändert. Gebiete, in denen die Dosis einen Schwellwert übersteigt, treten nach der Entwicklung des Resists als (positives oder negatives) Abbild der geschriebenen Strukturen hervor.

In Deutschland stellt die Firma Vistec Electron Beam GmbH Elektronenstrahl-Belichtungsanlagen¹ her. Vistec und die Firma EQUIcon Software GmbH arbeiten am Standort Jena seit Langem eng in verschiedenen Bereichen zusammen.

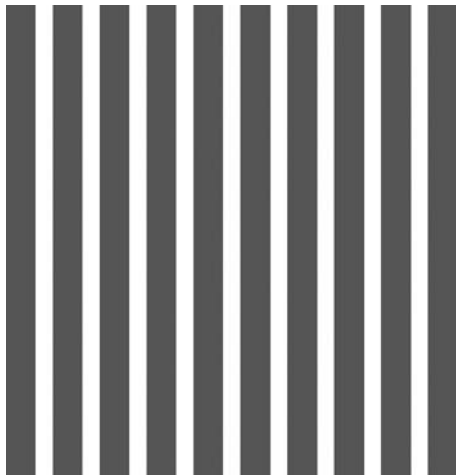


Bild 1. ein Line-Space-Pattern

Leider sieht das Belichtungsergebnis auf dem Substrat meist etwas anders aus als das, was man mit dem Schreiben erreichen wollte. Das liegt aber in der Natur der Sache und nicht daran, dass man schlecht geschrieben hätte. Belichtet man beispielsweise eine Linie - ein langes Rechteck mit vergleichsweise geringer Breite -

¹ Auch wenn Elektronen benutzt werden, spricht man vom *Belichten*.

mit einer über die Rechteckfläche gleichmäßig verteilten Energiedosis, erhält man gewöhnlich als Resultat unter Umständen eine etwas schmalere und verkürzte Linie. Außerdem erscheinen die Ecken des Rechtecks abgerundet. Besonders die Verkürzung stört sehr. Man denke an elektrische Verbindungen, die dadurch unterbrochen würden.

Hinzu kommt noch Folgendes: Belichtete Strukturen in der Nachbarschaft einer Stelle auf dem Substrat haben einen störenden Einfluss auf die betrachtete Stelle. Die Vorstellung ist die, dass auftreffende Elektronen durch Resist und Substrat „diffundieren“ und dabei Dosis nicht nur an der Auftreffstelle, sondern auch in ihrer Umgebung in den Resist einbringen. Man spricht vom Proximity-Effekt. Auch bei der nachfolgenden Entwicklung des Resists gibt es Diffusionsprozesse chemischer Substanzen.

Zur Illustration ein Beispiel der Belichtung eines sogenannten *Line-Space-Patterns* - als Test-Pattern nach wie vor gern genommen (Bild 1).

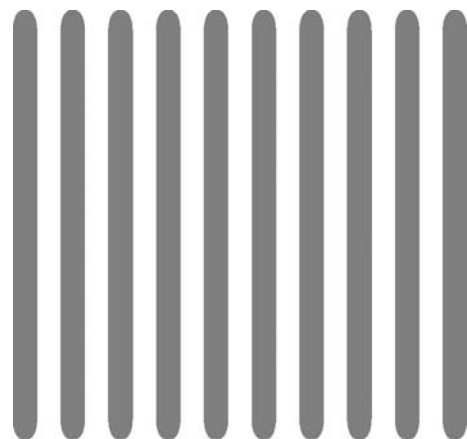


Bild 2. Belichtungsergebnis

Parallele Linien gleicher Breite und mit gleichem Lini-
enabstand werden belichtet. Etwas übertrieben dargestellt
sieht das Belichtungsergebnis dann etwa so aus wie
in Bild 2 dargestellt. - Nicht ganz, die Linien zu der

Mitte hin sollten im Bild etwas breiter erscheinen als Linien nahe am Rand. Auch wurde in der Darstellung die zu beobachtende Kantenrauigkeit, die es immer gibt, vernachlässigt.

Es existieren Möglichkeiten und kommerzielle Software-Produkte, um den Proximity-Effekt zu korrigieren. Dies kann durch Dosisvariation oder mittels Geometrieänderung erreicht werden. Um zusätzlich das Prozessfenster zu vergrößern, haben wir, EQUIcon, das Verfahren GIDC (Geometrically Induced Dose Correction) [2] erfunden und dazu ein Patent eingereicht. Dieses Verfahren modifiziert die Geometrie derart, dass die folgende Dosiszuweisung immer zu einer Kantenkontraststeigerung führt. Dadurch sinken *LWR* (Line Width Roughness) und *LER* (Line Edge Roughness). Durch das vergrößerte Prozessfenster wirken sich Störeinflüsse in nachfolgenden Prozess-Schritten wie zum Beispiel Entwickeln, „Post Exposure Bake“, Ätzen, usw. weniger stark aus.

Das nachfolgende Bild zeigt, was eine Korrektur bewirken kann:

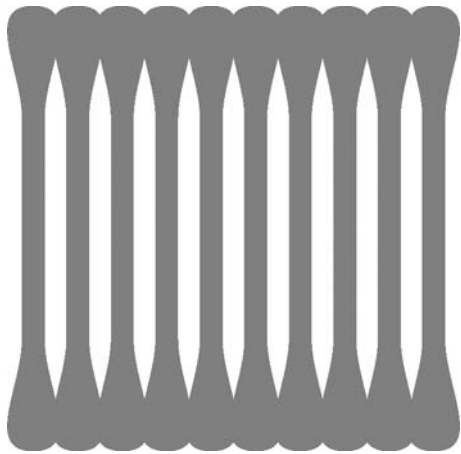


Bild 3. extremes Ergebnis mit klassischer LES-Korrektur

Die Linien haben die richtige Breite (in ihrer Mitte) und durch eine *LES*-Korrektur (*LES* für Line End Shortening) auch die richtige Länge. Dieser Korrekturmechanismus separiert eine Figur am Linienende und vergibt die zugehörige Dosis so, dass das Linienende stimmt. Man beobachtet nun an kritischen Stellen allerdings einen „Streichholzkuppen-Effekt“. Dieser kann so stark werden, dass die verbreiterten Linienenden verschmelzen wie in Bild 3. Das ist selbstverständlich mehr als unerwünscht.

2 Belichtungssimulation

SBcon ist ein von EQUIcon entwickeltes Programm zur Belichtungssimulation. Anstatt nach erfolgter Belichtung mittels eines CD-SEM (Critical Dimension Scanning Electron Microscope) die Abbildungsqualität der Belichtungsstrukturen auszumessen und eventuell eine neue Belichtung mit veränderten Korrekturparametern zu starten, können die erwarteten Belichtungsergebnisse durch das Simulationsverfahren berechnet und vermessen werden.



Bild 4. Original und Bild

Der Anwender kann somit viele unnötige und teure Belichtungen und sehr viel Zeit einsparen. Andererseits ist es für den Entwickler dieser Korrekturverfahren wichtig, zu wissen, dass dieses Verfahren hinreichend gut funktioniert.

Um zu verifizieren, dass das Belichtungsmodell und seine Implementation in *SBcon* richtig sind, wird *SBcon* in unserem Fall auf eine Serie von Testpatterns angewandt. Der Vergleich mit einer späteren Belichtung zeigt, wie gut Simulation und Praxis übereinstimmen.

Gemäß des Modells berechnet *SBcon* die zweidimensionale Faltung der durch das Korrekturverfahren zugewiesenen Dosis mit einer geeignet gewählten (rotationssymmetrischen) *Process Proximity Function*, abgekürzt *PPF*. Ergebnis ist die zu erwartende Dosisverteilung auf dem Substrat. Bild 4 soll das illustrieren.

Die Bestimmung der „richtigen“ *PPF* sowie die Festlegung auf die „perfekten“ Korrekturparameter sind nach wie vor ein Gegenstand der Forschung. [3]

Ausgangspunkt für die Verifikation des Korrekturverfahrens war ein Skript, das *SBcon* beliebig oft hintereinander mit verschiedenen Parametern und dem Input-Pattern aufruft. Das Input-Pattern ist eine große Datei, in der zweidimensionale geometrische Figuren mit zugeordneten Dosen im E-Beam-Maschinenformat beschrieben sind. Es enthält matrixartig angeordnete, quadratische Bereiche mit verschiedenen Line-Space-Patterns.

Die Parameter beschreiben insbesondere bestimmte *ROIs* (Regions Of Interest), in denen kritische Strukturen durch die Simulation vermessen werden sollen.

Die einzelnen Simulationen beziehungsweise Messaufgaben sind unabhängig voneinander durchführbar. Die Ergebnisse werden in einer speziellen Form akkumuliert. Die Resultate einer Einzelsimulation mit *SBcon* sind eine CSV-Datei mit detaillierten Messwerten, eine Bookmark-Datei im XML-Format, die zum Auffinden der kritischen Strukturen und der Mess-Stellen in einem Visualisierungsprogramm namens *SBvis* nützlich ist (Bild 5), und eine Bilddatei – denn der Augenschein vermittelt mitunter einen besseren Eindruck als eine Liste von Zahlen. Siehe dazu auch Bild 6.

Somit besitzt das Verfahren ausreichend Generik, so dass damit ein verallgemeinerter Dienst, wie der Grid-Worker, genutzt werden kann.

3 Gridworker und SBcon

Nach Anpassungen in der *SBcon*-Software, insbesondere der Neuentwicklung der Ausgabe von Simulationsergebnissen sowie der Entwicklung neuer, angepasster Messverfahren, sind die Simulationsberechnungen



Bild 5. Bookmark in SBvis

nun gut geeignet als eine Anwendung für den *Grid-Worker* von André Schneider (Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen in Dresden), der für uns den Grid-Worker-Job erstellt und auch die Simulation auf den Grid-Ressourcen der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg laufen lassen hat. Wie Grid-Worker genau funktioniert, soll hier nicht erklärt werden. Es ist ein Mittel, um die Ausführung von Berechnungen für einen gegebenen Parameterraum auf Grid-Ressourcen zu organisieren. Selbstverständlich, damit Grid-Worker Berechnungen starten kann, müssen Inputdaten und auf den Zielplattformen ausführbare Programme und was diese so „zum Leben“ benötigen (z.B. Bibliotheken), bereitgestellt werden.

Der Parameterraum ist bei der SBcon-Simulation übersichtlich. Er lässt sich leicht in der Terminologie des Grid-Workers formulieren. Für eine gegebene Anzahl von ROIs sind jeweils mehrere spezielle Rechnungen auszuführen.

Die Ergebnisse der parallelen Einzelsimulationen müssen, um die Ergebnisse am Ende genau so vorliegen zu haben, wie nach der seriellen Berechnung – das ist der Anspruch – am Ende geeignet zusammengefasst werden. Im einfachsten Fall sind CSV-Dateien nur zu verketteten. Aus den einfachen XML-Dateien wird eine neue, die den gewünschten Header, die einzelnen Bookmarks und den Abspann enthält.

4 Ergebnisse

Neben den für uns interessanten Ergebnissen der Simulation hat sich gezeigt, dass für 1000 Simulationen die Bearbeitung auf Grid-Rechnern in Erlangen nur zwei bis zehn Minuten dauerte. Das serielle Durchrechnen auf einem Arbeitsplatz-PC hätte dagegen mehrere Stunden gedauert.

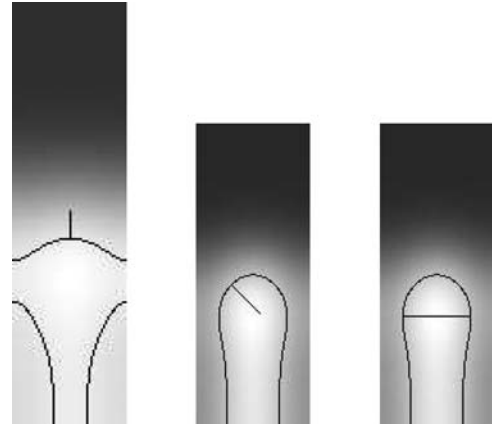


Bild 6. Beispiele für Ergebnisbilder

5 Aus Sicht des Kunden

Das Programm SBcon ist in ein größeres Programmsystem namens *ePLACE* eingebunden, das von EQUIcon entwickelt und vertrieben wird. Typischerweise besitzt ein Kunde ein HPC-Cluster oder schafft ein solches extra an, um darauf unter Regie von *ePLACE* Berechnungen ausführen zu lassen. Es handelt sich dabei nicht nur um die SBcon-Simulations-Läufe sondern vielmehr um die gesamte sehr zeit- und ressourcenintensive Datenvorbereitung, das heißt die Erzeugung des Maschinenformates und die Durchführung der Proximity-Korrektur. Die Idee ist, statt des kundeneigenen HPC-Clusters Grid-Ressourcen zu nutzen. Das würde sehr hohe Anschaffungskosten für die Rechentechnik wegfallen lassen. Andererseits, es bringt auch Probleme mit sich:

- Vertraulich zu behandelnde Daten müssen das Haus des Kunden verlassen. Nicht alle Kunden werden das zulassen.
- Die Installation von Programmteilen auf Grid-Ressourcen ist mitunter schwer, was an den komplexen Randbedingungen liegt, die die Programmteile erfüllt sehen müssen. Bei SBcon war es vergleichsweise einfach. Außer der Programmdatei selbst waren nur noch eine spezielle Version einer Shared Library und ein passendes Lizenzfile beizulegen.
- Obwohl für die Grid-Welt nicht außergewöhnlich groß, sind die hin und her zu transferierenden Datenmengen erheblich, was die Sache teuer macht, wenn über das Datenvolumen abgerechnet wird.
- Während ein lokales HPC-Cluster für den Kunden jederzeit verfügbar ist, sind Grid-Ressourcen nicht exklusiv für den einen Kunden da.
- Die Hardwareausstattung der HPC-Cluster ist weitgehend konstant. Somit lassen sich die Programme für diese Hardware optimieren (CPU, GPU) und in üblicher Weise lizenzieren (z.B. MAC-Adressen-basiert).

Zur Lösung der beiden erstgenannten Probleme gibt es bereits einige Vorschläge. Vertrauliche Daten können transparent ver- und entschlüsselt werden, so dass außer Haus niemals unverschlüsselte Kundendaten als File auf einem Speichermedium existieren. *Parrot* ist zum Beispiel

ein Programm, das so etwas leistet.

Statt einzelne Programme auf Grid-Ressourcen zu installieren, ist es möglich, die Installation in einer virtuellen Maschine vorzubereiten und dann das Image der virtuellen Maschine als Grid-Job laufen zu lassen. Dadurch finden alle Programme ihre gewohnte Umgebung vor.

Für die letztgenannten Probleme stehen die Lösungsansätze teilweise noch aus.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Optinum-Grid-Projektes haben wir erfolgreich Grid-Rechenkapazität nutzen können. Mit der Belichtungssimulation konnte der Grid-Worker getestet werden. Weiterhin wurde in einer virtuellen Maschine das ePLACE-Programmsystem im Grid ausprobiert. Im Zuge der Weiterentwicklung des ePLACE-Produktes könnte man sich für die Zukunft eine direkte Interaktion zwischen Oberfläche und Grid vorstellen, welche eine sogenannte Full-Chip-Belichtungssimulation durchführt, um kritische Stellen auf den Input-Daten zu entdecken.

Diese Art von Simulation ist auf gewöhnlich verfügbaren Rechnern wegen fehlender Rechen-Performance heutzutage noch nicht durchführbar.

7 Acknowledgement

Diese Arbeit wurde unterstützt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland. (FKZ 01IG09011B)

Literatur

- [1] OptiNum-Grid:
<http://www.d-grid-ggmbh.de/index.php?id=99>
- [2] R. Galler et al:
Modified Dose Correction Strategy for Better Pattern Contrast, Proc. SPIE 7545, 75450F1-75450F12. (2010)
- [3] R. Galler et al:
PPF-Explorer: Pointwise Proximity Function Calibration Using a New Radial Symmetric Calibration Structure, Proc. SPIE 8166. (2011)