



greenict.connect²³



Nachhaltigkeit als Innovationstreiber in der Halbleiterfertigung

Dr. Anne Meister
Dr. Paul Jakob

Green ICT Connect – September 2023

MERCK



01

Merck Electronics &
Nachhaltigkeit

Merck verpflichtet sich zu Nachhaltigkeit in der Elektronikindustrie

Für uns als globales Unternehmen ist Nachhaltigkeit ein essenzieller Bestandteil unserer Strategie. Wir wollen wirtschaftlich erfolgreich sein und einen langfristigen Mehrwert für die Gesellschaft leisten.

„Es ist unser Ziel, Antworten auf die Nachhaltigkeitsherausforderungen unserer Zeit zu finden. Wir sind überzeugt, dass Forschung und technologischer Fortschritt die effektivsten Mittel sind, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Mit unseren innovativen Produkten tragen wir aktiv zum Erfolg unserer Kunden bei – heute und in Zukunft.“

Kai Beckmann

Mitglied der Geschäftsleitung von Merck
und CEO Electronics



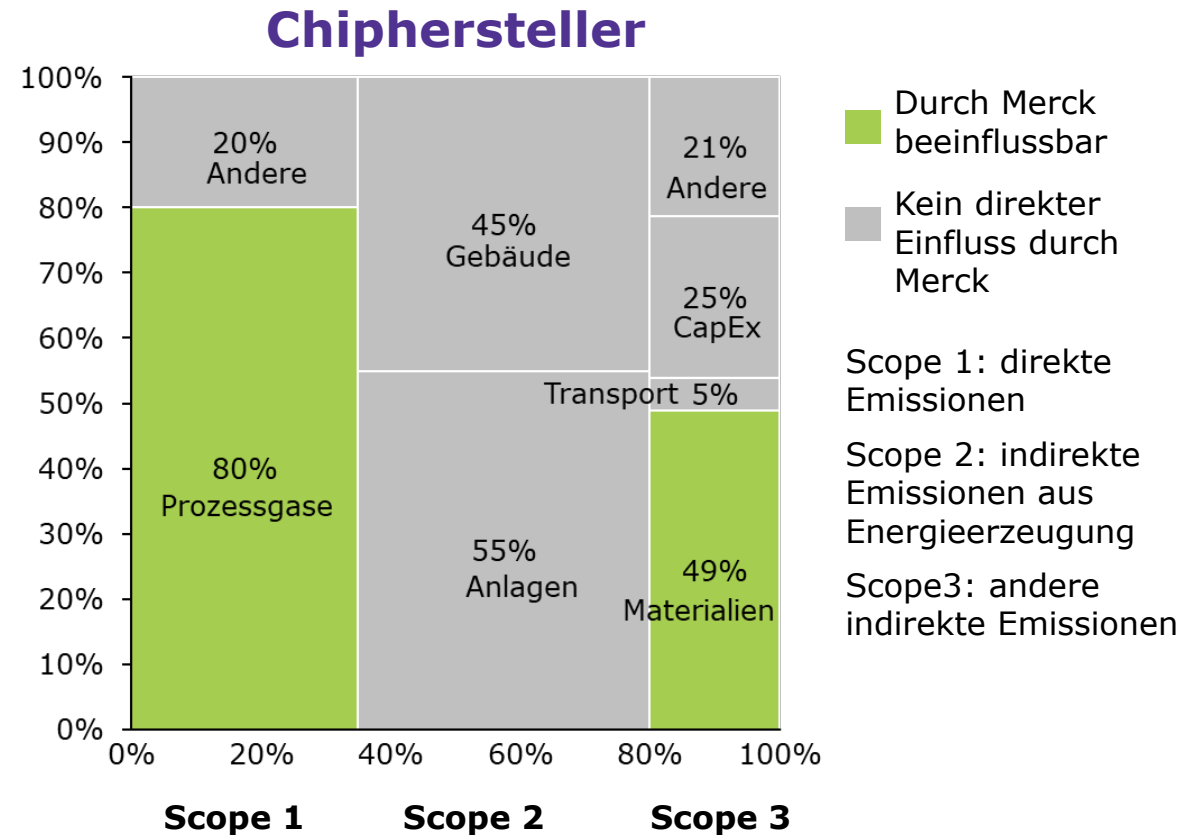
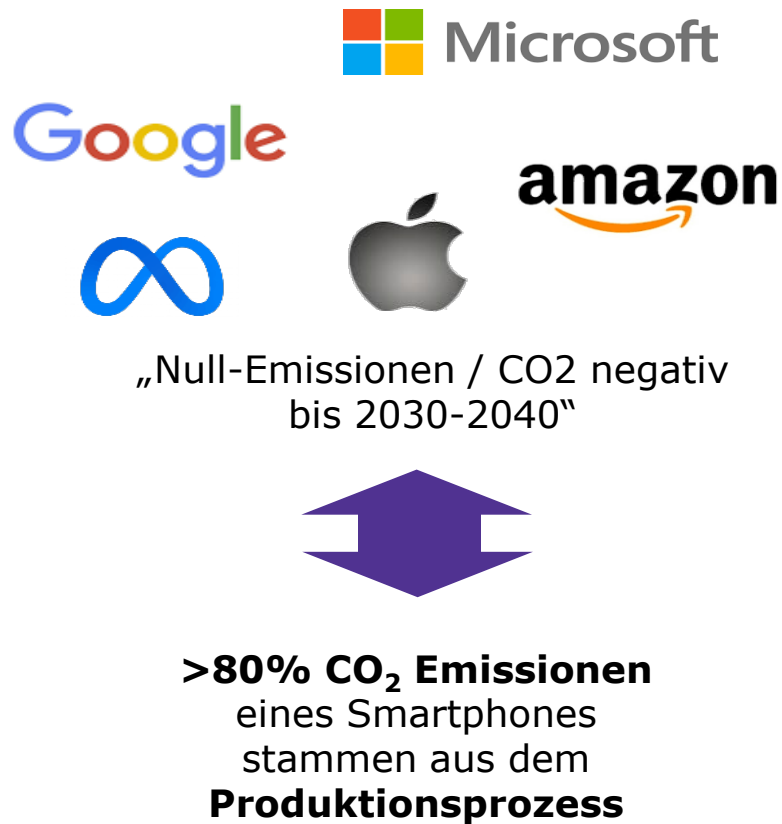
[Link zum Merck Electronics Sustainability Whitepaper](#)

Merck Electronics bietet innovative Materialien und Dienstleistungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette an.



Nachhaltigkeit – Null-Emissionen in der Wertschöpfungskette bis 2030

Prozess-Gase und Materialien als größte Hebel für die Chipindustrie



Prozess-Gase und Materialien als größte Hebel für CO₂-Äquivalent-Reduktion in der Chipherstellung

Nachhaltigkeit in R&D – Kundenkollaborationen – Forschungskonsortien

R&D-Programme adressieren größte Herausforderungen



NF₃ Reduktion
erfolgreich in
Pilotanlage
umgesetzt

NF₃ hat den größten
Anteil an den
Treibhausgas-
Emissionen von Merck

Umsetzung in Hometown
(US) zeigt Einsparung
von 90% der Emissionen

Plan: Ausrollen in allen
Merck-Standorten bis
2024



**Entwicklung
nachhaltiger
Ätzgase** in
Zusammenarbeit
mit Micron

Gemeinsame
Entwicklung neuer
Ätzgase mit niedrigem
Treibhausgas-Potential
(GWP)



Grüne Lösemittel
für die
Reinigungsprozesse
in der Halbleiter-
herstellung

R&D Produkt AZ[®]
Remover 910 als
effizientes Lösemittel zur
Wafer-Reinigung mit
erhöhter Effizienz.



**Ersatz PFAS-
haltiger
Produkte** wird in
diversen R&D
Projekten
adressiert

PFAS-Materialien für die
Lithographie können
nicht einfach durch
alternative Materialien
ersetzt werden.

Verschiedene R&D
Programme adressieren
dieses komplexe Thema.



Programm mit
Intel zu
**nachhaltigen
Halbleiter-
Prozessen und
Technologien**

Grundsatzvereinbarung
von Intel & Merck
unterzeichnet.

Auswahl der
Projektvorschläge in der
finalen Phase.

Nachhaltigkeit in R&D – Kundenkollaborationen – Forschungskonsortien

R&D-Programme adressieren größte Herausforderungen



NF₃ Reduktion
erfolgreich in
Pilotanlage
umgesetzt

NF₃ hat den größten
Anteil an den
Treibhausgas-
Emissionen von Merck

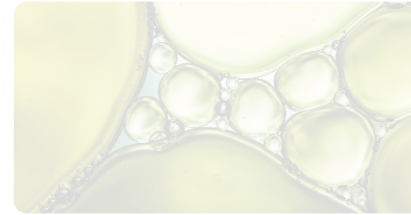
Umsetzung in Hometown
(US) zeigt Einsparung
von 90% der Emissionen

Plan: Ausrollen in allen
Merck-Standorten bis
2024



**Entwicklung
nachhaltiger
Ätzgase** in
Zusammenarbeit
mit Micron

Gemeinsame
Entwicklung neuer
Ätzgase mit niedrigem
Treibhausgas-Potential
(GWP)



Grüne Lösemittel
für die
Reinigungsprozesse
in der Halbleiter-
herstellung

R&D Produkt AZ[®]
Remover 910 als
effizientes Lösemittel zur
Wafer-Reinigung mit
erhöhter Effizienz.



**Ersatz PFAS-
haltiger
Produkte** wird in
diversen R&D
Projekten
adressiert

PFAS-Materialien für die
Lithographie können
nicht einfach durch
alternative Materialien
ersetzt werden.

Verschiedene R&D
Programme adressieren
dieses komplexe Thema.



Programm mit
Intel zu
**nachhaltigen
Halbleiter-
Prozessen und
Technologien**

Grundsatzvereinbarung
von Intel & Merck
unterzeichnet.

Auswahl der
Projektvorschläge in der
finalen Phase.

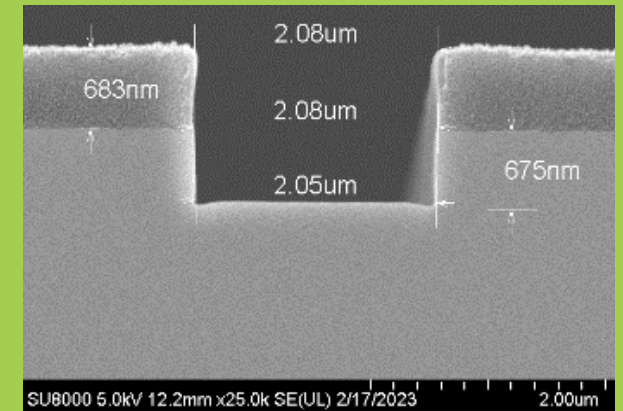
02

Entwicklung nachhaltiger Ätzgase

Warum Fluorierte Ätzgase?

SiO₂

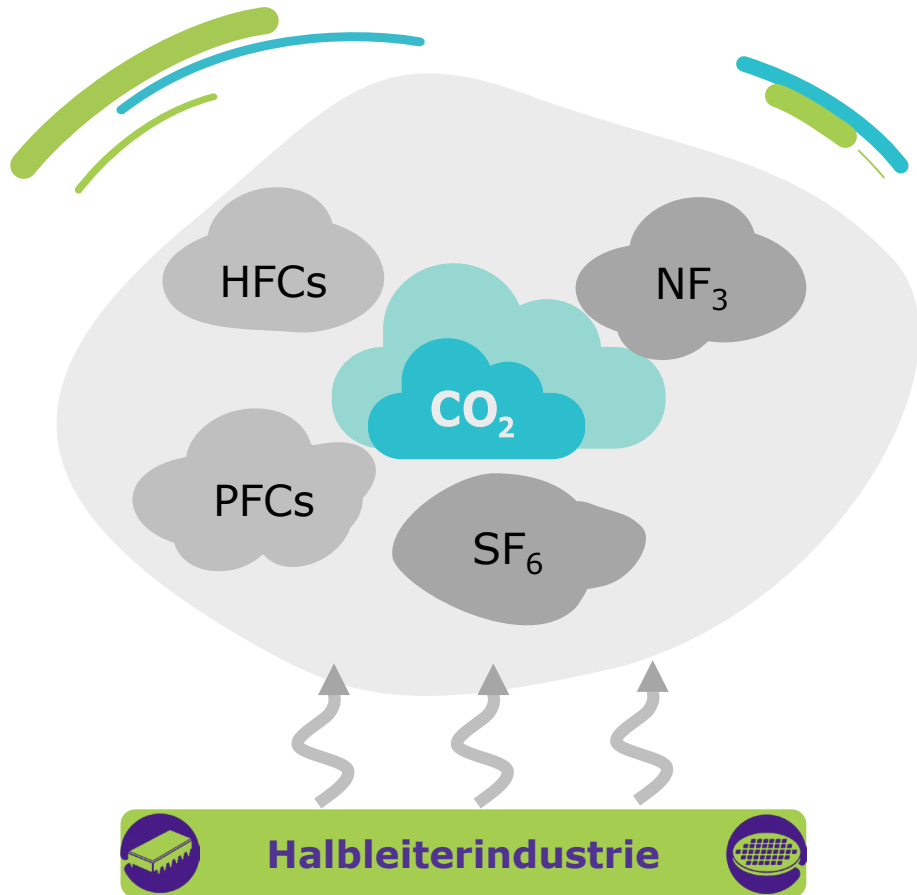
- Das am meisten genutztes Isolationsmedium in der Halbleiterindustrie.
- Die Strukturierung bedarf Ätzprozessen, bei denen SiO₂ zersetzt wird.



- Nur die Si-F Bindung ist stärker als die Si-O Bindung und kann als Triebkraft für das Ätzen genutzt werden (565 kJ/mol vs. 452 kJ/mol).
- Fluor ist das einzige Element, das SiO₂ ätzen und in flüchtige Verbindungen umwandeln kann.

Fluorierte Ätzgase in der Halbleiterindustrie

Ätzgase als Treiber von Scope 1-Emissionen



*Daten aus „2020 US EPA emissions figures“ der Halbleiterindustrie

>600.000 t CO₂e
Emissionen in den
USA allein durch
Einsatz von NF₃!*

Entspricht
Emissionen von
131.000 Autos

Ätz- und Reinigungsgase sind für **74%** aller Scope 1 Emissionen in der Halbleiterindustrie verantwortlich.

Verbindung	GWP
CO ₂	1
SF ₆	23.500
CF ₄	7.390
NF ₃	16.100
CHF ₃	12.400
C ₄ F ₈	10.300

GWP = Global Warming Potential

HFC = Fluorierte Kohlenwasserstoffe

PFC = Perfluorierte Kohlenwasserstoffe

Entwicklung nachhaltiger Ätzgase in Merck Electronics

Design & Synthese von Ätzgas-Materialien mit niedrigem GWP

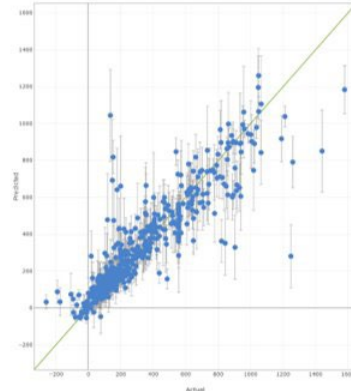
Moleküldesign durch Modellierung

Simulation als Screening-Tool für neue Moleküle.

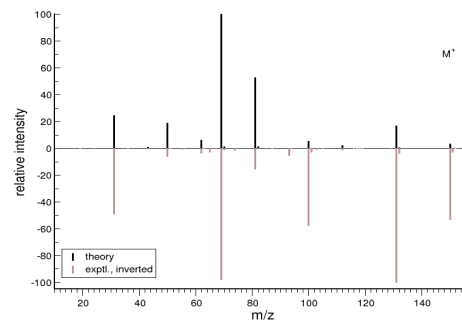
Simulation der Molekül-Fragmentierung während des Ätzvorgangs im Plasma durch MS Spektren.

Modelle zur Vorhersage von GWP, Ätzraten & Selektivitäten.

- Ermittlung von Struktur-Aktivitäts-Beziehungen.
- Identifizierung der vielversprechendsten Moleküle für die Synthese.



Korrelation simulierter Ätzraten mit gemessenen

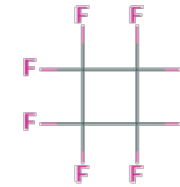


Korrelation simulierter Massenspektren mit gemessenen

Synthese neuer Moleküle im Labormaßstab

Designstrategie für ein niedriges GWP:

Reaktive Verbindungen, die im Plasma zersetzt werden.

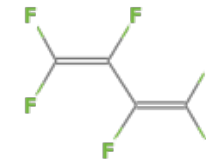


Hohes GWP

$$\text{GWP}_{100} = 10.300$$

Keine strukturelle "Schwachstelle"

Hohe Stabilität



Niedriges GWP

$$\text{GWP}_{100} < 1$$

Doppelbindungen als mögliche Angriffspunkte für Zersetzung

Hochreaktives Material

Entwicklung nachhaltiger Ätzgase in Merck Electronics

Evaluierung des Ätzverhaltens



In-House-Evaluierung des Ätzverhaltens

Systematische Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Ätzverhalten und Molekülstruktur.

Zusammenarbeit mit R&D Kollegen in USA.



Evaluierung der Ätzleistung

- Ätzrate
- Selektivität



Emissionsmessung

- Plasma-Chemie
- Abfallprodukte



Ätzgas	GWP	Relative Ätzrate	Emissionen (CO ₂ eq)
C ₄ F ₈	Hoch	100 %	Basis
C ₄ F ₆	Niedrig	83%	< 10% bezogen auf Basis
Neues Ätzgas	Niedrig	105%	< 10% bezogen auf Basis

Standard-Ätzgase mit niedrigem GWP (z.B. C₄F₆) weisen oft niedrigere Ätzraten auf

Neue Ätzgase zeigen ein vergleichbar niedriges GWP wie C₄F₆ und zeitgleich eine erhöhte Ätzrate.

Aufbau einer Bibliothek neuer Ätzgase um spezifischen Kundenanforderungen begegnen zu können.

R&D Projekte adressieren zentrale Kundenanforderungen

Merck Electronics vereinbart Nachhaltigkeit und Performance

Nachhaltige Materialien

Unsere Kunden wollen nachhaltige Materialien einsetzen um ihre nachhaltigkeitsziele zu erfüllen und einen positiven Beitrag für die Umwelt zu leisten.

- Niedriges GWP
- Verringerung kritischer Emissionen



Kunden-Anforderungen
vereinbaren

Verbesserte Performance

Gleichzeitig werden unsere Materialien auch den neuen Anforderungen an die Technologie gerecht und ermöglichen unseren Kunden einen Vorteil am Markt.

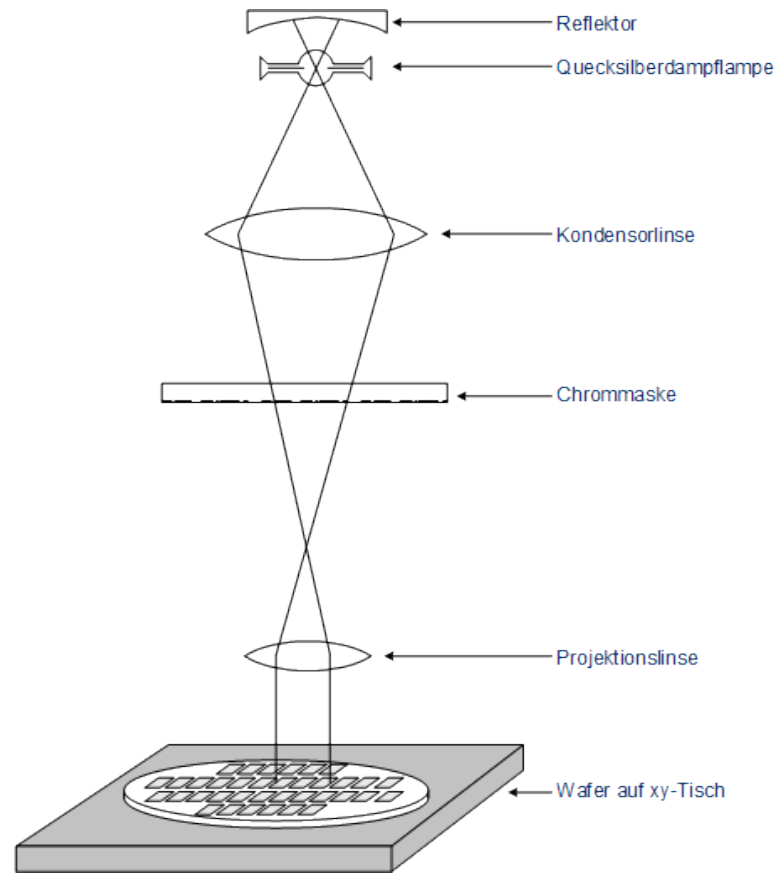
- Höhere Ätzzraten
- Bessere Selektivität

03

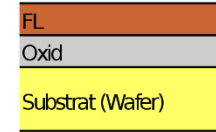
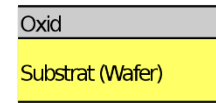
PFAS in der Fotolithographie

PFAS in der Fotolithographie

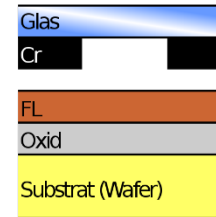
Strukturierung mit Fotolacken (Fotoresisten)



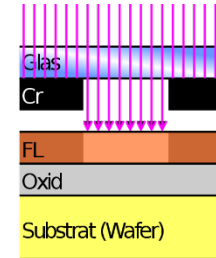
a. Wafervorbereitung b. Fotolackauftrag



c. Ausrichtung der Fotomaske



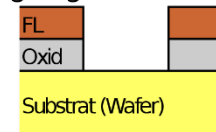
d. Belichtung



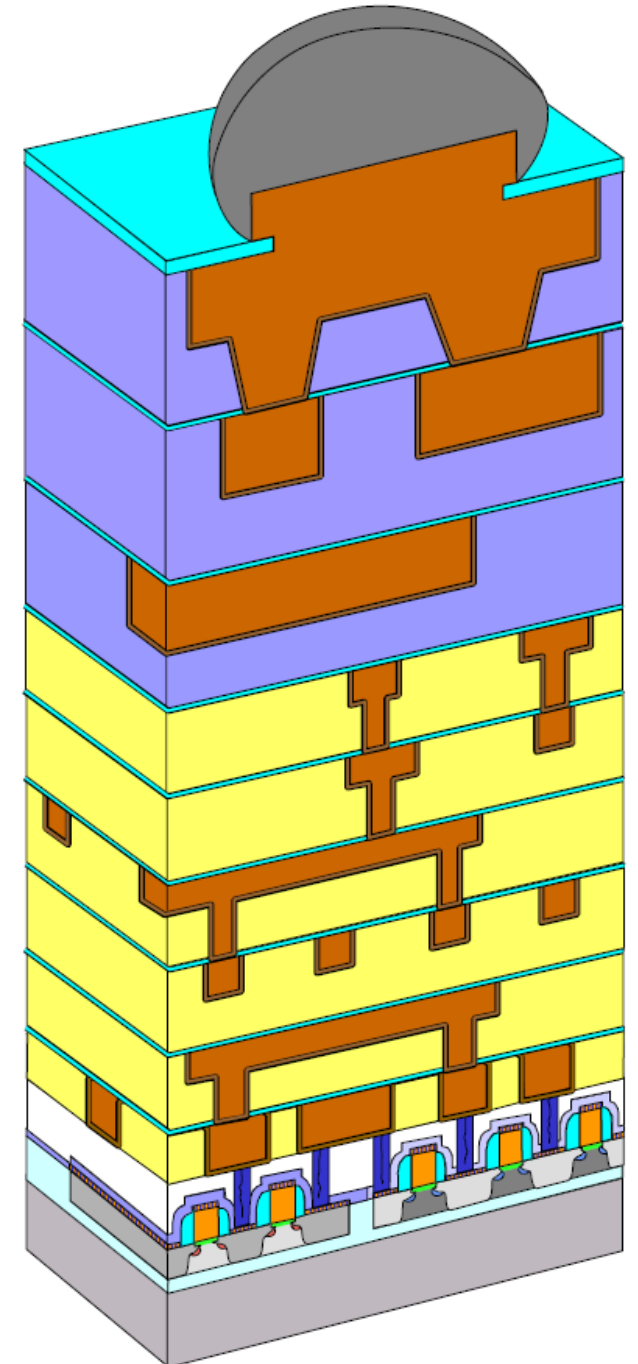
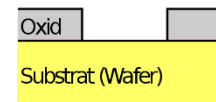
e. Entwicklung der Fotolackmaske



f. Ätzung der freigelegten Schicht

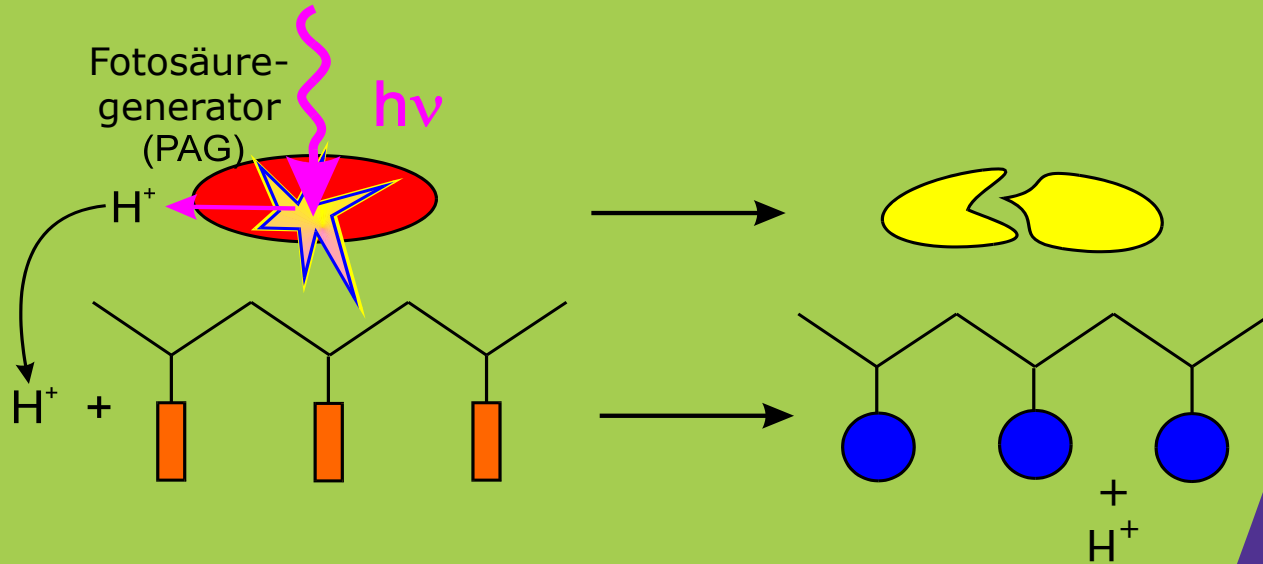


g. Entfernung der Fotolackmaske



PFAS in der Fotolithographie

Chemisch Verstärkte Fotolacke

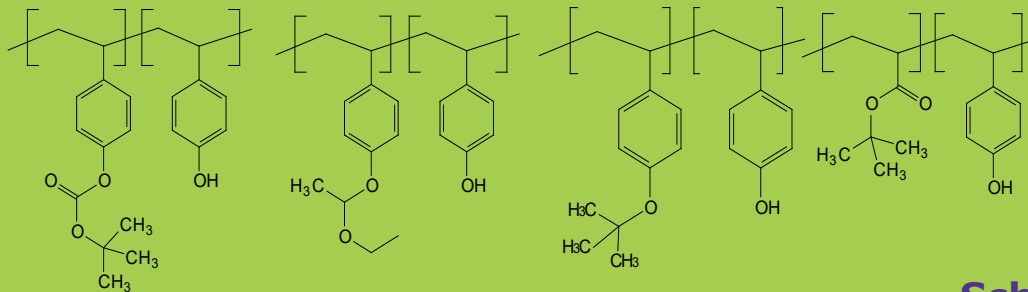


t-BOC-PHS

Acetal-PHS

Ether-PHS

ESCAP-PHS



Schutzgruppen-Aktivierungsenergie [2]

Einfluss der Aktivierungsenergie auf das Leistungsverhalten: [1]

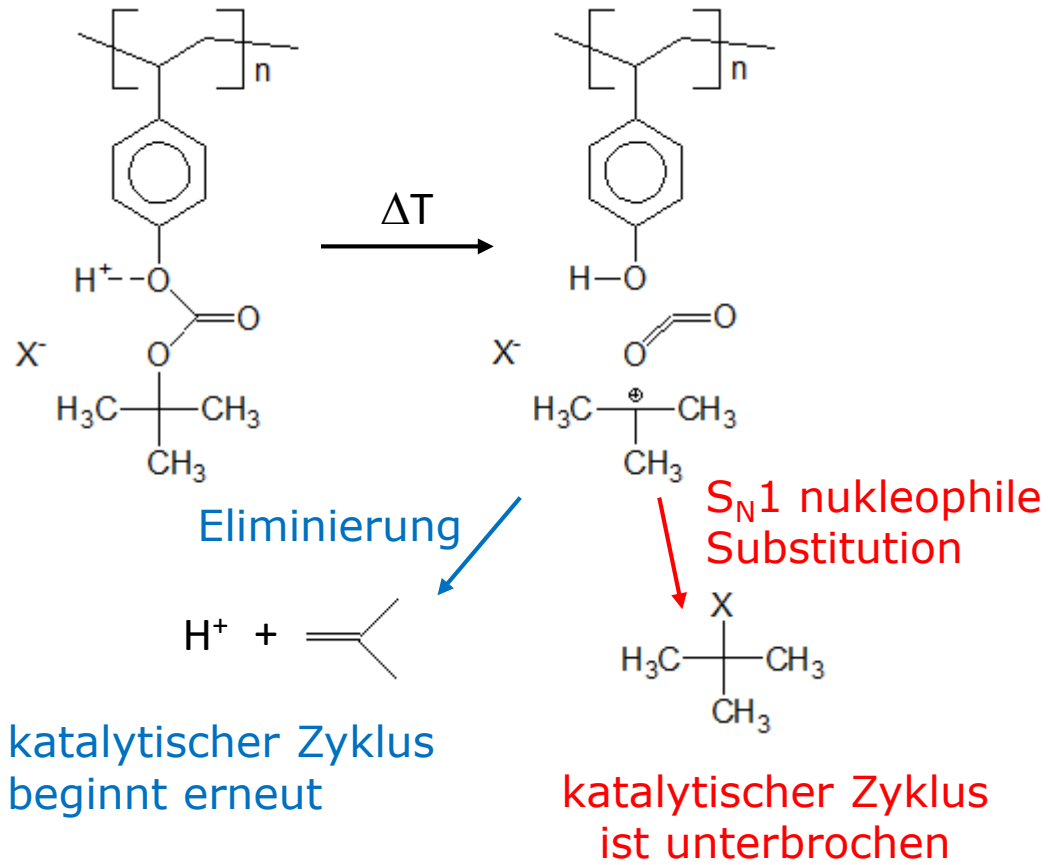


[1] H. Ito, "Chemical Amplification Resists for Microlithography" Advances in Polymer Science, Vol 172 (2005).

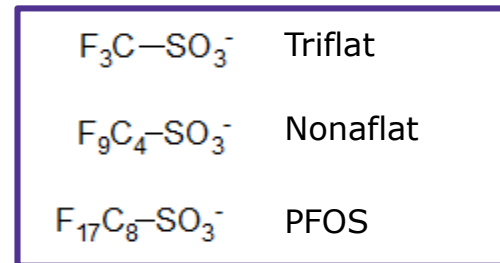
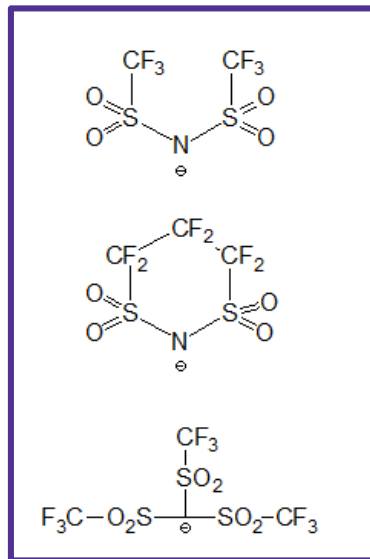
[2] D. K. Lee, G. Pawlowski „A Brief Review of DUV Resist Technology" J. Photopolymer Science Technology, Vol 15 (2002).

PFAS in der Fotolithographie

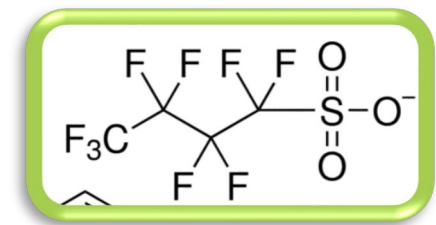
Fotosäuregeneratoren (PAG) für Chemisch Verstärkte Fotolacke



PAG Anion	Nukleophilie	andere Nachteile
PF ₆ ⁻	Nein	Dotiermittel
AsF ₆ ⁻	Nein	toxisch
SbF ₆ ⁻	Nein	toxisch
Cl ⁻ , Br ⁻ , I ⁻	Ja	---
R-SO ₃ ⁻	Nein	---

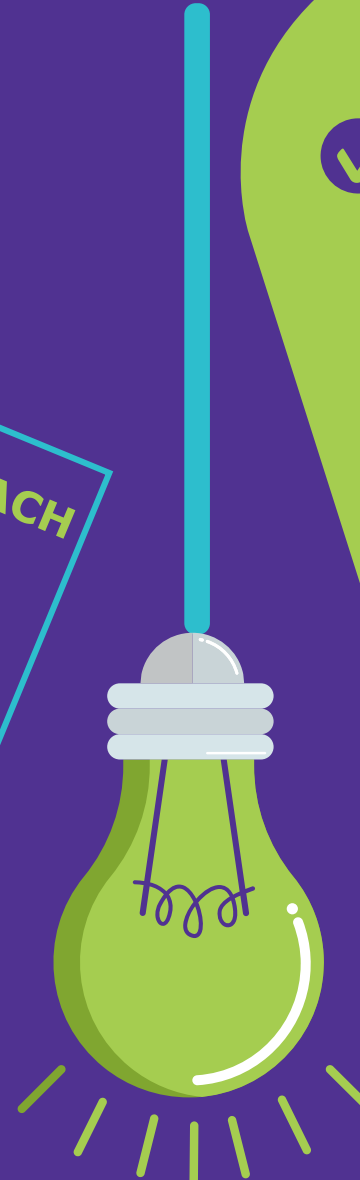
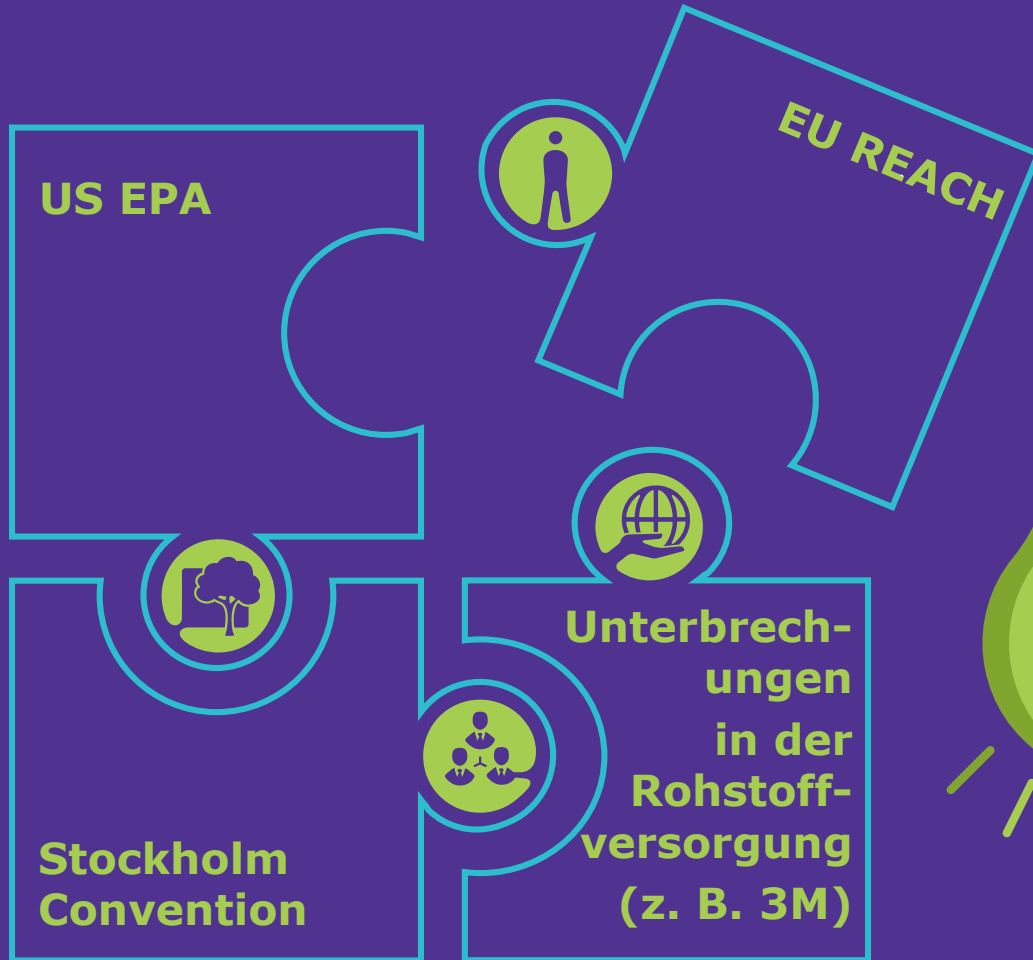


Arbeitstier der Halbleiterindustrie [3]



[3] C. K. Ober, F. Käfer, J. Deng "The essential use of fluorochemicals in lithographic patterning and semiconductor processing" Journal Micro/Nanopattern. Mater. Metrol. 21(1), (2022).

Die Halbleiterfertigung wird sich bald umorientieren müssen



C8 PFAS: PFOS & PFOA sind mit wenigen Ausnahmen global verboten.

C6 PFAS: PFHxS wurde zum Annex A (Verbotsliste) der Stockholm Convention hinzugefügt und die EU hat ein Verbot von **PFHxA** vorgeschlagen.

US EPA hat einen strategischen Fahrplan 2021-2024 mit **PFAS Restriktionen und Meldepflichten** eingeführt.

Generelle PFAS Restriktion vorgeschlagen von Mitgliedsstaaten der EU soll in 2025 in Kraft treten.

Erste Anzeichen von **schwerwiegenden Versorgungsunterbrechungen** durch den freiwilligen Austritt **3Ms aus dem PFAS-Geschäft**.

Der Schlüssel zu einem maßgeschneiderten Fotosäuregenerator

Säurestärke

Zerfall zu einer **starken nicht-nukleophilen Säure** mit hoher Quantenausbeute.

Absorption

Das **Chromophor** reagiert sehr sensibel auf die Beleuchtungswellenlänge, während das **Gegenanion** diese **nicht absorbieren** darf.

Gegenseitige Abhängigkeit [4]

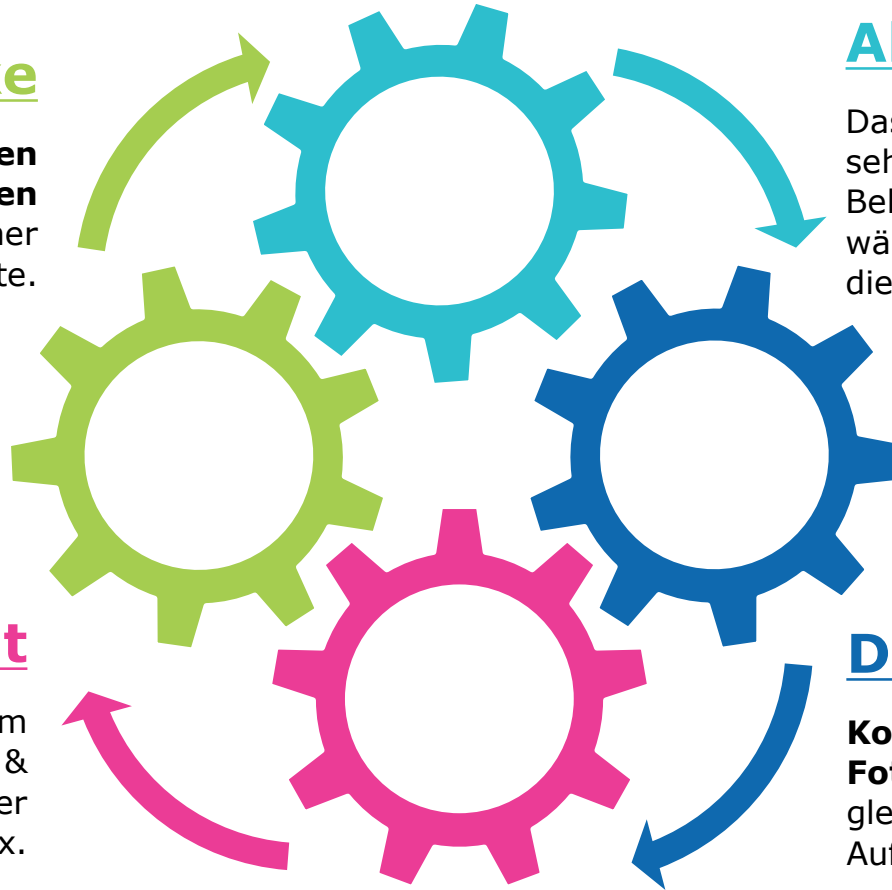
Diese vier Parameter können nicht unabhängig voneinander optimiert werden!

Löslichkeit

Gute Löslichkeit im Lösungsmittelsystem & Kompatibilität in der Harzmatrix.

Diffusionsfähigkeit

Kontrolle der Fotosäurediffusion zwecks gleichmäßiger Strukturgrößen, Auflösung und Kantenunschärfe.



[4] "PFAS-Containing Photo-Acid Generators Used in Semiconductor Manufacturing" - Semiconductor PFAS Consortium Photolithography Working Group Case Study (2023).

PFAS in der Fotolithographie

Kommerzielle Substitution

Die Industrie rechnet mit einer Vorlaufzeit von mehr als 25 Jahren! [5]

Grundlagenforschung & Entwicklung:

- akademische Beteiligung
- Kooperation mit Sublieferanten von Materiallieferanten
- Charakterisierung der Toxizität zwecks regulatorischer Anmeldung

Forschung der Materiallieferanten

- erste Sichtung & Vorauswahl
- Neuproduktevaluierung & Qualifizierung
- Iterative Entwicklung mit Sublieferanten
- Forschungsausweitung auf Neuproduktentwicklung
- erste Kundenbemusterung

Forschung der Halbleiterfertiger und kommerzielle Qualifikation

- Initiierung der Neuproduktevaluierung
- Skalierung auf Pilotmaßstab und Reduktion der Defekte
- Ausweitung der Forschungsergebnisse auf kommerzielle Produktion mit Ausbeutenoptimierung
- Dokumentation & Änderungsmanagement

Jahre 0

3-4

6-12

20-25+

Iterativer Ansatz

Ausweitung der Anwendungsgebiete

04

Nachhaltigkeit als Möglichkeit

Die Karten werden neu gemischt!

Die gesamte Halbleiterindustrie steht vor einem Umbruch durch den intensiven Fokus auf Nachhaltigkeit.

Die einzigartige Marktposition von Merck ermöglicht es diese Neuausrichtung der Branche aktiv mitzugestalten.

Gemeinsam mit dem EU Chips Act und der Ansiedlung großer Halbleiterunternehmen bietet dies eine einmalige Chance, Deutschland und Europa als Standort für die Zukunft dieser Industrie zu stärken.

Danksagung



Deutschland

Fumio Kita
Philipp Fackler
Daniela Carja
Eileen Wroblewski
Isabelle Georg
Lars Eric Simson
Peer Kirsch
Jens Eichhorn
Thomas Mergner
Wiebke Unkrig

Belgien

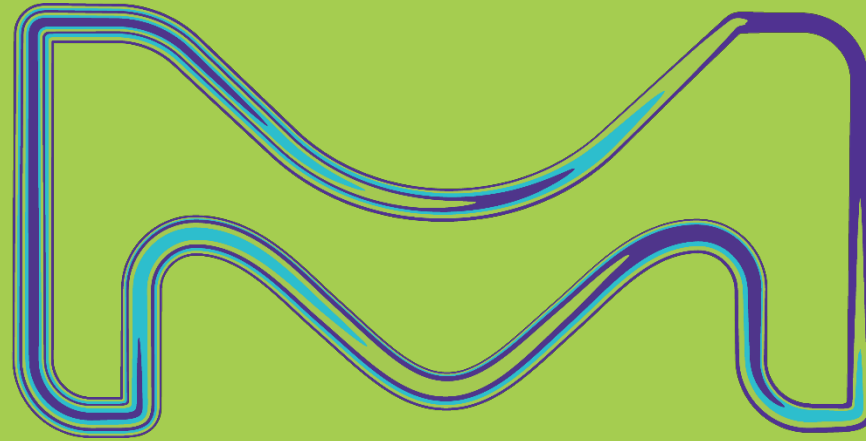
Youngjun Her
Viktor Kampitakis

USA

Ralph Dammel
Frank Houlihan
Chunwei Chen
Hung-Yang Chen
Matthias Stender
Forrest Brown
Robert Ridgeway
James Nehlsen
Marisa Gliege
Agnes Derecskei

Japan

Takayuki Sao
Kenta Watanabe
Hiroshi Hitokawa
Fumiaki Takagi



Merck, the vibrant M are trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates.
All other trademarks are the property of their respective owners.



greenict.connect²³