



MATQu

Materials for Quantum Computing

Abschlussbericht - Kurzbericht

18. November 2024

Teilvorhaben	Prozessmodule und Messtechnik zur Herstellung und Charakterisierung von Quantum Bits (CryoMATQu)
Verbundprojekt	Materials for Quantum Computing (MATQu)
Zuwendungsempfänger	Fraunhofer IPMS
Förderkennzeichen	13N15867
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021-31.05.2024
Berichtszeitraum	01.09.2021-31.05.2024

Benjamin
Lilienthal-
Uhlig

Digital unterschrieben
von Benjamin
Lilienthal-Uhlig
Datum: 2024.11.18
11:30:49 +01'00'

Kurzbericht

Ziel des MATQu-Projekts war die Validierung der Technologieoptionen zur Herstellung von supraleitenden Bauelementen auf industriellen 300 mm-Silizium basierten Prozessflüssen. Es umfasst Substrattechnologie, supraleitende Metalle, Resonatortechnologie, Through-Wafer-Via-Löcher, 3D-Integration und Variabilitätscharakterisierung. Die Substrat-, Prozess- und Testkompatibilität wird hinsichtlich der Integrierbarkeit von Qbits bewertet. Kernsubstrat- und Prozesstechnologien mit hohen Qualitätsfaktoren, verbesserter Materialabscheidung auf großen Substraten und erhöhter kritischer Temperatur für den supraleitenden Betrieb werden entwickelt und validiert. In den Bereichen Substrattechnologie, Prozesstechnologie und PProzessanlagen bringt das MATQu-Projekt wichtige europäische Akteure auf diesem Gebiet zusammen, darunter vier große RTOs. Die MATQu-Partner ergänzen sich in optimaler Weise entlang der Wertschöpfungskette, um einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil zu schaffen, z.B. durch schnellere Markteinführung und Einführung von Technologien und Materialien für bessere Josephson-Knotenpunkte für Quantencomputer.

Die Hauptaufgaben des Fraunhofer IPMS bestanden in der Entwicklung eines industriellen Prozessablaufs für die Herstellung supraleitender Resonatoren. Solche sind wesentliche Bauelemente für die Fertigung von supraleitenden QuBits und anderen supraleitenden Technologien (zB Logik oder Sensorik). Ein besonderer Augenmerk wurde auf die Verwendung neuartiger, CMOS-kompatibler Materialien gelegt, die sowohl verbesserte Eigenschaften haben aber auch leicht in industrielle Prozessflüsse, wie zB bei Halbleiter IDMs oder Foundries, integrierbar sind. Dies ist entscheidend vor allem für skalierbare Ansätze mit QuBit Anzahlen >1000. Ein wesentliches Ergebnis des Förderprojektes war somit die Entwicklung neuer Arten von supraleitendem Material basierend auf Metallnitriden. Es konnte gezeigt werden dass entscheidende Parameter wie kritische Temperatur, kritische magnetische Feldstärke und kritische Stromstärke den bisher benutzten Materialien überlegen sind. Weiterhin konnte gezeigt werden dass auch ein Fabrikationsfluss bis zur Fertigung eines messbaren Resonators in komplett CMOS-kompatibler Umgebung auf 300mm Waferlevel möglich ist.

Zusätzlich wurden neue Reinigungs- und Lackentfernungsprozesse evaluiert die zum einen extrem materialschonend, dies ist notwendig für eine hohe Qualität späterer QuBits, und zum anderen auch aus ökologischen Gesichtspunkten herkömmlichen Chemikalien überlegen sind.

Darüber hinaus ermöglichte das Projekt dem Fraunhofer IPMS ein enges europäisches Netzwerk mit anderen RTOs, Universitäten und der Industrie zu knüpfen. Daraus entstanden bereits vielfältige Folgeprojekte sowie weitere Möglichkeiten zur wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Verwertung. Intensive Zusammenarbeiten ergaben sich im Besonderen mit Intelligent Fluids, Siltronic, IQM sowie dem CEA-LETI.

Zusammenfassend war das MatQ Projekt ein wesentlicher Grundbaustein für die Entwicklung einer gesamt-europäischen Entwicklungskette für die Herstellung supraleitender Technologien, beginnend von Materialentwicklung, über die Integration von Bauelementen für supraleitendes Quantencomputing bis hin zu umfangreicher elektrischer Charakterisierung.



MATQu

Materials for Quantum Computing

Abschlussbericht – Eingehende Darstellung

18. November 2024

Teilvorhaben	Prozessmodule und Messtechnik zur Herstellung und Charakterisierung von Quantum Bits (CryoMATQu)
Verbundprojekt	Materials for Quantum Computing (MATQu)
Zuwendungsempfänger	Fraunhofer IPMS
Förderkennzeichen	13N15867
Laufzeit des Vorhabens	01.09.2021-31.05.2024
Berichtszeitraum	01.09.2021-31.05.2024

**Benjamin
Lilienthal-
Uhlig** Digital
unterscriben von
Benjamin Lilienthal-
Uhlig
Datum: 2024.11.18
11:33:09 +01'00'

Eingehende Darstellung

Einordnung der wesentlichen Ergebnisse in den Gesamtkontext, in das Gesamtprojekt sowie die Besonderheiten am Fraunhofer IPMS:

Resonatoren, wie z.B. in Form eines koplanaren Wellenleiters, sind Standardkomponenten für supraleitende Quantencomputer. Aufgrund ihrer überschaubaren Komplexität in Bezug auf Materialien und Prozessschritte eignen sie sich hervorragend als Testbauteile für das Screening neuer Materialien, verbesserter Prozesse und neuer Integrationsansätze.

Das Fraunhofer IPMS mit seiner Expertise in der fortgeschrittenen Halbleiterfertigung und seiner Infrastruktur auf 300-mm-Industrieanlagen hatte die Aufgabe, Supraleiter-Fertigungsprozesse in MatQ zu untersuchen, und über die Ergebnisse wird in diesem Dokument.



Abbildung 1: Blick in den 300mm Reinraum des Fraunhofer IPMS-CNT.

Die Hauptarbeiten des IPMS waren im Arbeitspaket 2.1 des Gesamtprojektes eingebettet: *Entwicklung und Optimierung von supraleitenden Resonatoren mit hohem Qualitätsfaktor*. Dabei sollten verschiedene supraleitende Materialien, darunter Al, Nb, Ta, In, TiN, TaN, NbN, NbTiN, V3Si, PtSi, auf grundlegende relevante Eigenschaften wie kritische Temperatur und Feld untersucht werden.

Das Design von Resonatorstrukturen, welches sowohl die Geometrie als auch die Materialparameter (z. B. kinetische Induktivität) berücksichtigt, wird angepasst, um bestimmte Resonanzfrequenzen im Betriebsbereich zu erreichen. Die hergestellten Strukturen werden optimiert, indem die Auswirkungen der Substratpräparation, der Filmmorphologie, der Ätzchemie und der thermischen Behandlung untersucht werden. Der Hauptteil des Fraunhofer IPMS konzentrierte sich auf das Screening supraleitender Materialien, wobei besonderes Augenmerk auf die Abscheidung CMOS-kompatibler supraleitender Materialien wie Silizide, TiN oder TaN gelegt wird. Es wurden Untersuchungen an unstrukturierten Schichten durchgeführt, um ein geeignetes Abscheideverfahren zu entwickeln, wobei die Schichteigenschaften (Dicke, Kristallinität, Gleichmäßigkeit, Rauheit usw.) kontrolliert und ihre Auswirkungen auf die supraleitenden Eigenschaften überprüft werden. Diese Tätigkeit sollte die von IMEC, VTT und CEA ergänzen. Darüber hinaus wurden verschiedene Konzepte für die Strukturierung in Betracht gezogen und geeignete Testvehikel für die Resonatorfertigung entwickelt, wobei die verfügbaren Techniken (PVD, RIE, CMP, ...) genutzt werden sollten, während gleichzeitig Zusammenhänge zwischen Material- und Struktureigenschaften (z. B. Größe der Struktur, Dicke, Rauheit der Linienkanten, usw.) hergestellt werden.

Allgemeiner Prozessfluss:

Ein allgemeiner Ablauf für die Herstellung von Resonatoren ist in Abbildung 2 dargestellt. Man beginnt mit der Abscheidung, die in der Regel auf PVD-Verfahren basiert, gefolgt von der Strukturierung durch Lithografie und Ätzen. Dazwischen müssen mehrere Messungen auf Wafer Ebene oder im Labor durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu optimieren. Schließlich kann ein strukturiertes Bauelement elektrisch charakterisiert werden. Für den Lithografieschritt muss das Design/Layout entwickelt werden. In diesem Projekt lag der Schwerpunkt auf den mit Blau gefüllten Modulen, d. h. Abscheidung, Litho und Ätzen, einschließlich ihrer jeweiligen Charakterisierungsschleifen.

Das Testdesign wurde mit dem Projektpartner IQM eingehend diskutiert und an das IPMS übertragen.

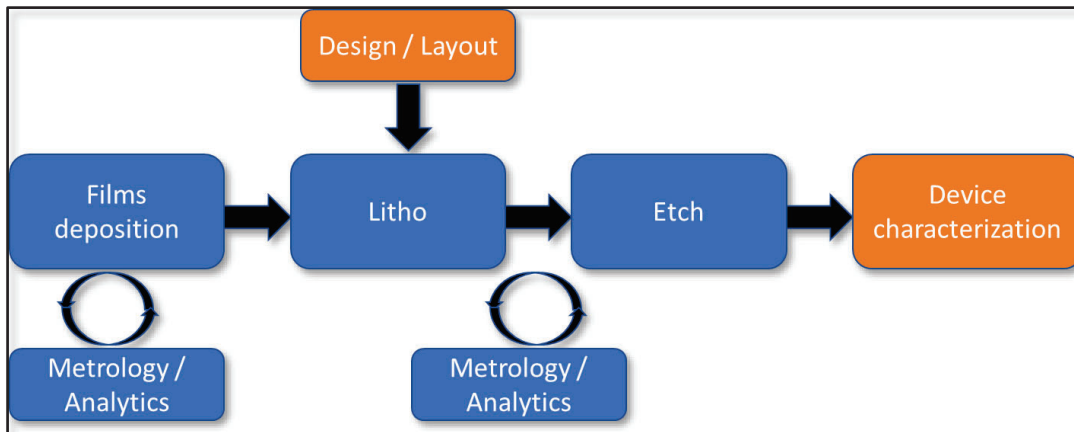


Abbildung 2: Genereller Prozessfluss für die Resonatorfertigung. Die Module in blau wurden speziell am Fraunhofer IPMS bearbeitet.

Abscheidung:

Ziel des Projekts war es, verbesserte Materialien und Prozesse für herstellbare, skalierbare Lösungen auf Wafer Ebene zu entwickeln. Daher wurden Materialien ausgewählt, die üblicherweise in der CMOS-kompatiblen Halbleiterfertigung in großen Stückzahlen verwendet werden. Am Fraunhofer IPMS stehen mehrere 300-mm-Prozessanlagen zur Verfügung, und die Abscheidung erfolgte an einer AMAT Endura Clover PVD-Clusteranlage (siehe Abbildung 3). Hier steht eine Vielzahl von Materialien zur Verfügung, die die von der CMOS-Fertigung bekannte hervorragende Schichtqualität und Gleichmäßigkeit aufweisen.



Abbildung 3: 300mm PVD Sputteranlage von AppliedMaterials für modernste Dünnfilmabscheidung

Zwei verschiedene Materialfamilien wurden als vielversprechende neue Kandidaten ausgewählt: Filme auf Ta- und Ti-Basis. Ihre Abscheidung wurde so angepasst, dass die gewünschte Schichtdicke mit guter Gleichmäßigkeit auf dem 300-mm-Wafer erreicht wurde. Zusätzliche Analysen wurden durchgeführt, um den spezifischen Widerstand, die Rauheit, die Morphologie und die Zusammensetzung der Schichten zu untersuchen. Die Ergebnisse für verschiedene TiN-Splits sind in den Abbildungen 4-7 dargestellt.

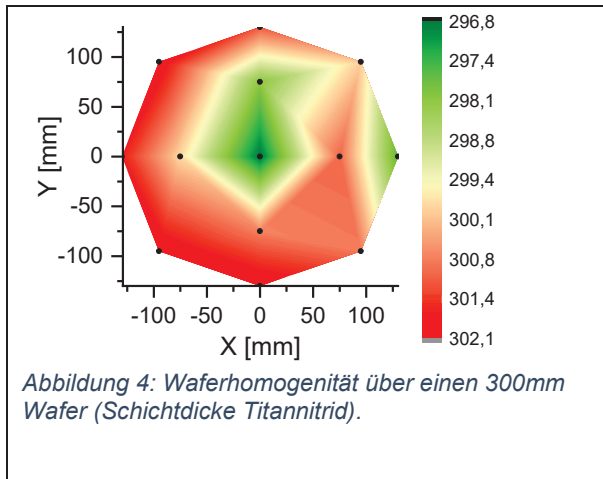


Abbildung 4: Waferhomogenität über einen 300mm Wafer (Schichtdicke Titannitrid).

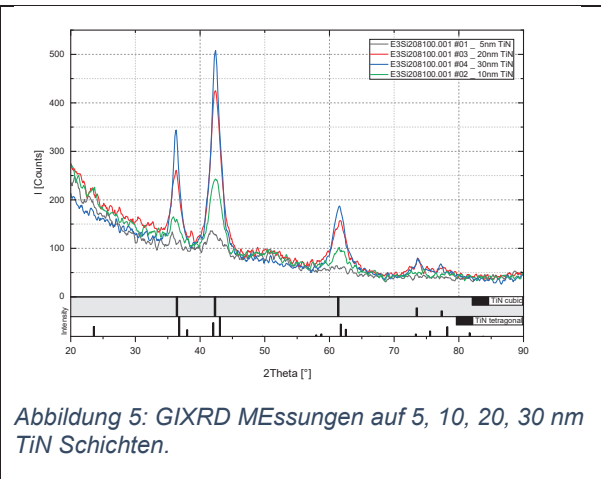


Abbildung 5: GIXRD Messungen auf 5, 10, 20, 30 nm TiN Schichten.

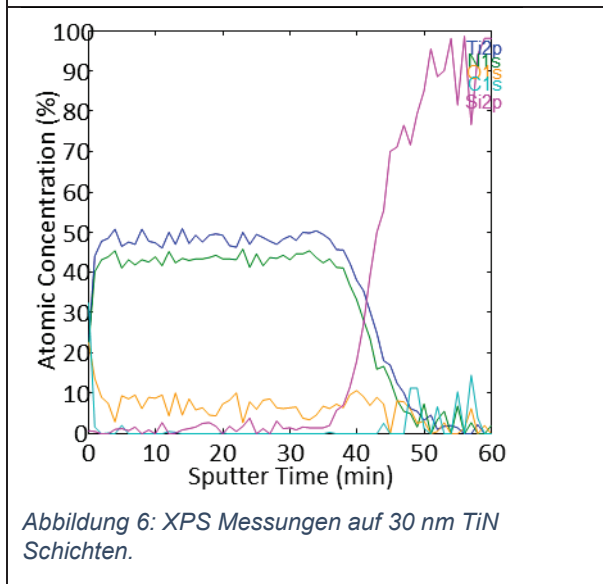


Abbildung 6: XPS Messungen auf 30 nm TiN Schichten.

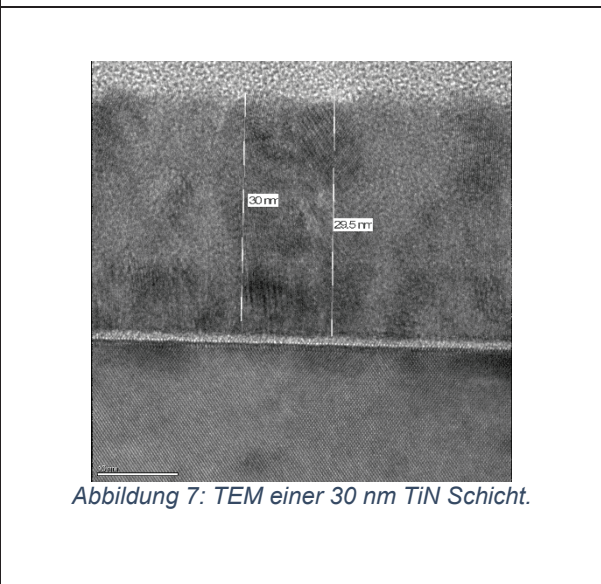


Abbildung 7: TEM einer 30 nm TiN Schicht.

In ähnlicher Weise könnten supraleitende Resonatoren auf Ta-Basis eine nützliche Alternative darstellen. Entsprechende Daten für Tantalfilme sind in den Abbildungen 8-11 dargestellt. Besonders hervorzuheben ist das Auftreten der gewünschten, supraleitenden alpha-Ta-Phase.

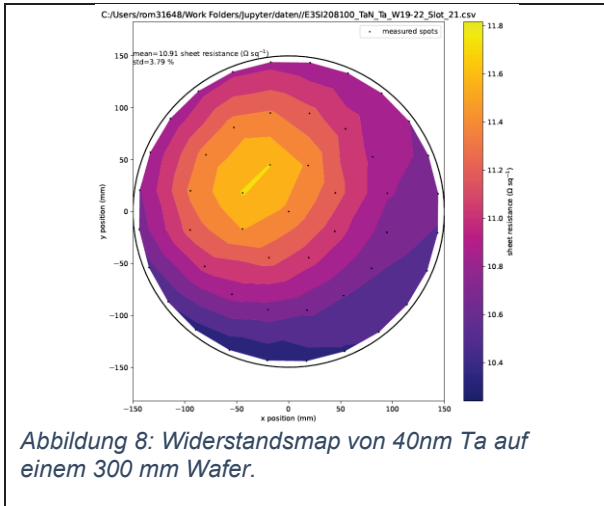


Abbildung 8: Widerstandsmap von 40nm Ta auf einem 300 mm Wafer.

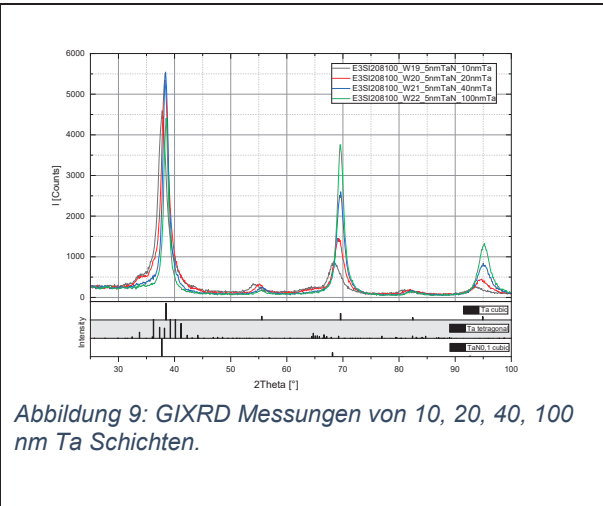


Abbildung 9: GIXRD Messungen von 10, 20, 40, 100 nm Ta Schichten.

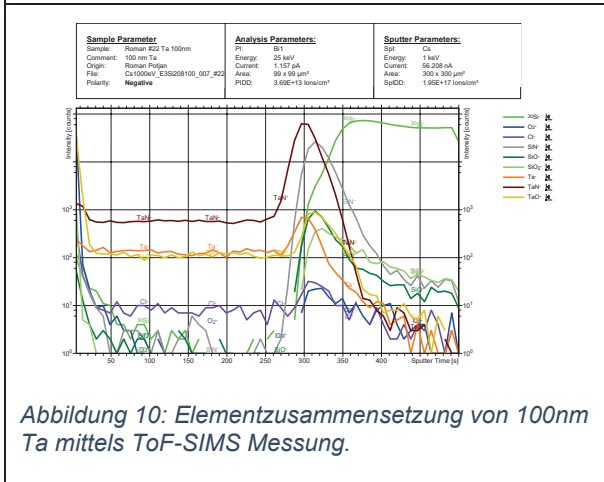


Abbildung 10: Elementzusammensetzung von 100nm Ta mittels ToF-SIMS Messung.

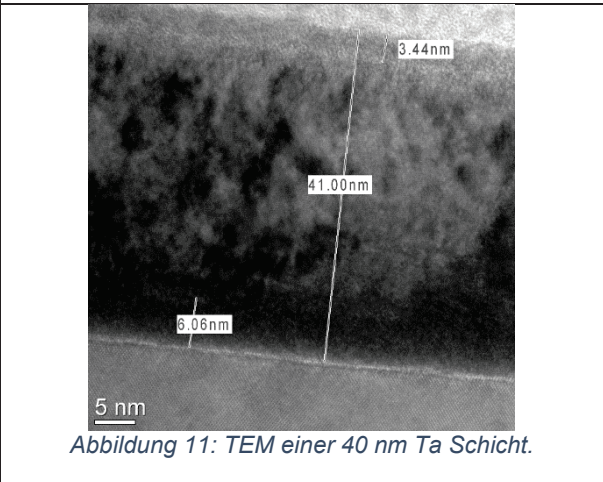


Abbildung 11: TEM einer 40 nm Ta Schicht.

Kryo-Charakterisierung:

Erste externe Messungen ergaben Supraleitfähigkeit, insbesondere bei den dickeren alpha-Ta-Schichten. Um schnellere Rückkopplungsschleifen zu erhalten, wurden zudem interne Kryocharakterisierungsmöglichkeiten eingerichtet. Zu diesem Zweck wurde ein OptiCool im elektrischen Charakterisierungslabor des Fraunhofer IPMS CNT installiert. Dieses Gerät kann bis zu 1,7 K messen und verfügt über zusätzliche HF-Funktionen sowie die Möglichkeit, ein Magnetfeld von bis zu 7 T anzulegen. Es können sowohl drahtgebundene Coupons als auch dedizierte Nadelaufbauten verwendet werden, zusätzlich wurden 'Attocubes' für die Nanomanipulation installiert, siehe Abbildung 12.

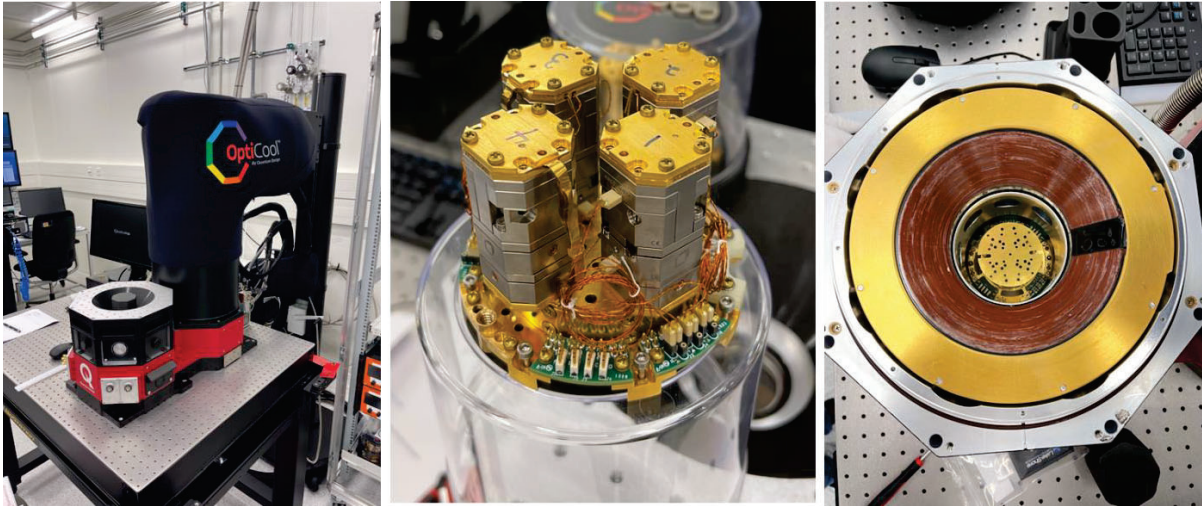


Abbildung 12: Kryo Messsetup am Fraunhofer IPMS-CNT, links: OptiCool System, Mitte: Attocube Piezosetup, Rechts: Probenaufnahme.

Lithographie:

Um dem gesamten MatQ-Konsortium Vergleichsmöglichkeiten zu bieten, wurde von IQM ein gemeinsames Design/Layout zur Verfügung gestellt. Die erforderlichen Layout-Dateien wurden bearbeitet und kompiliert, um mit dem Lithographie-Tool des Fraunhofer IPMS CNT kompatibel zu sein. Hierfür wurde ein Vistec Shaped Beam Direct Write E-Beam verwendet (Abbildung 13), um schnelle maskenlose Prototyping-Teststrukturen zu erstellen und schnellere Rückkopplungsschleifen zu haben.



Abbildung 13: VISTEC Elektronenstrahlschreiber am Fraunhofer IPMS-CNT

Die IQM-Testresonatorstrukturen „MQ1“ und „MQ2“ wurden zusammen mit mehreren Fraunhofer-eigenen Teststrukturen auf einem 300-mm-Wafer verteilt. Das erforderliche E-Beam-Jobdeck (Abbildung 14) wurde erstellt und die entsprechenden Lithografieprozessentwicklungen, d. h. Resistevaluierung, Studien zum Proximity-Effekt, Dosisvariationen usw., durchgeführt.



Abbildung 14: Job deck der MatQ Resonator Teststrukturen für die E-Beam Lithographie.

Strukturierung:

TiN wurde als erster Kandidat für die Herstellung der Resonatorstrukturen ausgewählt, da bei der Herstellung von CMOS-Halbleitern bereits Erfahrungen mit nützlichen Ätzverfahren gesammelt wurden. Es wurde eine ICP-Ätzkammer auf einem AMAT Centura Mainframe verwendet und Experimente zum reaktiven Ionenätzen auf Chlorbasis durchgeführt. Beginnend mit Selektivitätstests, d.h. der Durchführung von Ätzraten- und Gleichmäßigkeitsexperimenten an TiN, Si und Resist, wurde ein gutes Prozessfenster gefunden, um die Lithographiestrukturen in die TiN-Schicht zu übertragen. Anschließend wurde ein sanfter „Ash“-schritt angewandt, um den Resist zu entfernen, aber die TiN-Schicht und das Substrat so unversehrt wie möglich zu halten.

Abbildung 15 zeigt eine lichtmikroskopische Ansicht der Resonator-Teststrukturen nach erfolgreichem Plasmaätzen.

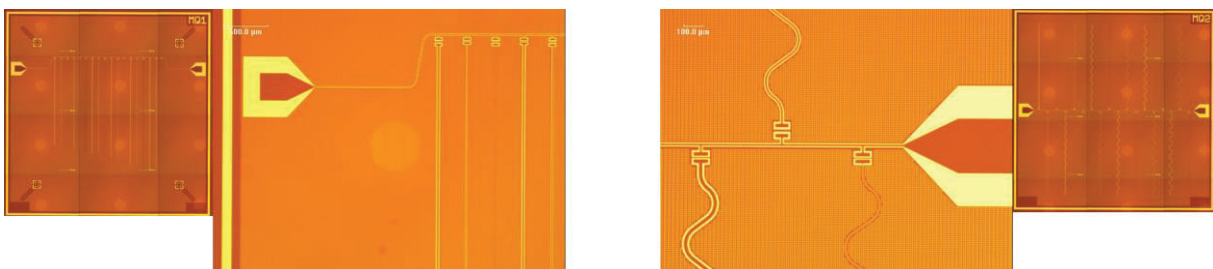


Abbildung 15: Mikroskopaufnahmen von Resonator-Teststrukturen auf IQM-Design (MQ1 und MQ2)

Ein REM-Querschnitt (Abbildung 16) zeigt die geätzte ~20 nm dicke TiN-Schicht auf dem Si-Substrat. Diese Messung wurde vor der Veraschung des Resists durchgeführt, die auf dem Bild noch zu sehen ist.

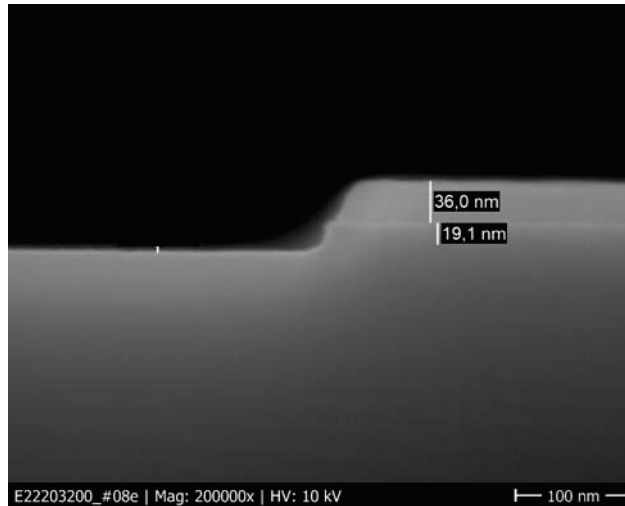


Abbildung 16: Querschnitt im REM einer strukturierten 20 nm TiN Schicht auf Silizium Substrat mit noch nicht entfernten Lackresten.

Dank der flexiblen E-Beam-Lithographie können auch andere Strukturen, wie nanometergroße supraleitende Bauelemente oder elektrische Messstrukturen, z. B. van-der-Pauw-Strukturen, auf demselben Chip integriert werden (siehe Abbildung 17). Diese können als Verwertung in späteren Projekt verwendet werden.

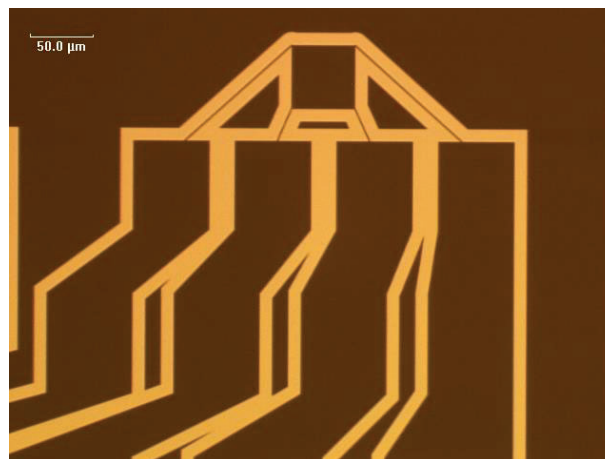


Abbildung 17: Van-der-Pauw Teststrukturen eingebettet im Resonator Testchip des Fraunhofer IPMS-CNT.

Entwicklung neuartiger Reinigungsansätze:

Für die Entwicklung von neuartigen und schonenden Reinigungs- und Lackentfernungsschritten erfolgten mehrere Abstimmungen mit dem Projektpartner Intelligent Fluids. Aus mehreren Vorgängerprojekten besteht bereits eine sehr gute Basis für die Zusammenarbeit. In einem ersten Schritt werden unstrukturierte Wafer mit abgeschiedenen supraleitenden Materialien (Ta, Ti, Hf, Co,... -basiert) an IFC geschickt, dort vereinzelt und einem breiteren Phasenfluid Screening zugeführt. Zielparameter sind hierbei die gewünschte Reinigungs- bzw. Lackentfernungsleistung, mögliche Schädigungen der Substrate sowie ideale Prozessparameter (Dauer der Behandlung, Temperatur, Rinse-Schritte). Erste Testversuche an der 300mm Anlage im CMOS-Reinraum des Fraunhofer IPMS-CNT waren erfolgreich. In einem weiteren Projekt sollen dann an wenigen geeigneten Phasenfluidkandidaten wafer-level Versuche an dieser Prozessanlage durchgeführt werden.

Zusammenfassung:

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein erfolgreicher Prozessablauf zur Herstellung vergleichbarer Resonatorstrukturen etabliert wurde. Mit diesem Material-Screening können Prozessparameter-Optimierung und neue Integrationsansätze charakterisiert und verglichen werden. Unter Verwendung von TiN als CMOS-kompatibles Standardmaterial wurden die kritischen Prozesse Schichtabscheidung, Lithographie und Plasmaätzung entwickelt. Weitere Materialien können nun integriert und die fertigen Devices weiter charakterisiert werden.

Im Rahmen des Projektes konnte eine Masterarbeit zum Thema: „Scalable co-sputtering of superconducting HfN and ZrN for quantum technologies“ erfolgreich abgeschlossen werden.

Zudem ergab sich die Vorstellung eines Poster bei der DPG Frühjahrstagung 2023 sowie eine Veröffentlichung unter Applied Physics Letters mit dem Titel: „300mm CMOS-compatible superconducting HfN and ZrN thin films for quantum applications“, <https://doi.org/10.1063/5.0176060>.