

Abschlussbericht

zum Teilvorhaben Hybrid-Dünnschichten für On-Chip-Quantenspeicher

im Verbundprojekt Netzwerkfähige Quantenspeicher mit Seltenerdionen (NEQSIS)

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart (Dr. R. Kolesov)

Förderkennzeichen des Teilvorhabens: 16KISQ031

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.21 – 30.04.25

Berichtszeitraum: 01.01.24 – 30.04.25

1. Einleitung

Langzeit-Quantenspeicher sind die zentralen Bausteine für Protokolle der Quanteninformationsverarbeitung und für Quantensicherheitssysteme. Letztere basieren auf dem bekannten No-Cloning-Theorem, das besagt, dass Quantensignaturen nicht gefälscht werden können. Allerdings müssen solche Signaturen über einen langen Zeitraum bestehen bleiben, was wiederum lange Kohärenzzeiten erfordert. Die längste jemals beobachtete Spinkohärenz (6 Stunden) wurde in einem Seltenerd-dotierten, nahezu kernspinfreien optischen Kristall erzielt – trivalentes Europium in Yttriumorthosilikat ($\text{Eu}^{3+}:\text{YSO}$). Diese Tatsache macht Seltenerd-basierte Festkörpersysteme zu den besten Kandidaten für die Langzeitspeicherung. Leider geht der Vorteil der langen Spinkohärenzzeiten von Seltenerd-Ionen (REIs) mit dem Nachteil sehr schwacher optischer Übergänge einher. Dadurch wird die optische Adressierung der REI-Spins ineffizient. In der Regel wird optische Quantenspeicherung unter Verwendung großer REI-Ensembles in REI-dotierten Kristallen mit relativ hoher Dotierungsdichte durchgeführt. Dies erfordert hohe Laser- und Mikrowellenleistungen, um die Spin-Ensembles zu initialisieren, Quanteninformationen in ihnen zu speichern und diese später wieder auszulesen. Darüber hinaus treten im gesamten REI-Ensemble Inhomogenitäten in den Laser-, Mikrowellen- und statischen Magnetfeldern auf, was zu geringer Speicher- und Auslesegenauigkeit führt.

Das Teilprojekt „Hybrid-Dünnschichten für On-Chip-Quantenspeicher“ zielte darauf ab, die oben genannten Probleme mit zwei unterschiedlichen Ansätzen zu lösen. Der erste Ansatz basierte auf einer Einkristall-Dünnschicht aus Praseodym-dotiertem Yttriumorthosilikat ($\text{Pr}:\text{YSO}$), die auf ein transparentes Substrat mit einem kleineren Brechungsindex als der des Films aufgebracht werden sollte, um Lichtleitung im YSO zu ermöglichen. Das resultierende „Sandwich“ sollte anschließend zu optischen Wellenleitern geformt und mit minimaler Grundfläche auf einem optischen Chip integriert werden. Ein kleiner Querschnitt des Wellenleiters führt zu einer starken Bündelung des Kontrolllaserfelds und der zu speichernden Photonen, während die kleine Grundfläche das Problem der Inhomogenität der Mikrowellen- und statischen Magnetfelder deutlich verringert. Diese Verbesserungen erhöhen die Effizienz der optischen Speicherung in REI-Ensembles erheblich. Die Aufgabe der USTUTT bestand in der Herstellung und Bereitstellung von $\text{Pr}:\text{YSO}$ -Wellenleitern für die TUDA.

Der zweite Ansatz sollte die Wechselwirkungsstärke zwischen REIs und Licht durch das Einbringen von REI-haltigem Material in einen optische Mikroresonator mit hohem Q-Faktor und kleinem Modenvolumen erhöhen. Die Wechselwirkung wird dabei durch den Purcell-Effekt

verstärkt, was eine optische Speicherung in kleineren REI-Ensembles oder sogar in einzelnen REIs ermöglicht. Zwei verschiedene Typen von Mikroresonatoren sollten dabei eingesetzt werden. Zum einen sollte ein mehrere Mikrometer dicker Pr:YSO-Dünnsfilm auf einen hochreflektierenden Spiegel aufgebracht und anschließend in einen Faserresonator mit hohem Q-Faktor und kleinem Modenvolumen integriert werden. Das Van-der-Waals-Kleben („Bonden“) des Dünnsfilms auf den Spiegel und das Ausdünnen auf die erforderliche Dicke war die Aufgabe der USTUTT, während die eigentlichen Speicherexperimente am KIT durchgeführt werden sollten. Als zweiter Typ von Mikroresonatoren waren photonische Kristallresonatoren (PCC) geplant, die aus einem dünnen, mit Ytterbium dotierten YSO-Film gefertigt werden sollten. Diese Art von optischen Resonatoren hat – zusätzlich zur direkten On-Chip-Integration – den Vorteil einer hohen Skalierbarkeit, wodurch sich mehrere Quantenknoten auf demselben Chip herstellen lassen. Darüber hinaus war geplant, Lithiumniobat auf Isolator (LNOI) als transparentes Substrat für die Yb:YSO-PCCs zu verwenden. LNOI ist bekannt für seine exzellenten elektro-optischen Eigenschaften, die eine effiziente dynamische Steuerung der Purcell-Verstärkung ermöglichen. Die Herstellung eines solchen Hybridmaterials, bestehend aus zwei Dünnschichten – LNOI und Yb:YSO (oder einem anderen kernspinfreien seltenerd-dotierten Kristall) – würde somit die Entwicklung skalierbarer und steuerbarer On-Chip-Quantenspeicher ermöglichen.

2. Detaillierte Beschreibung der im Projekt durchgeführten Arbeiten

Im Folgenden werden die Arbeiten, Fortschritte und Ergebnisse des Teilprojekts an der Universität Stuttgart im Detail beschrieben. Die an der Universität Stuttgart durchgeführten Arbeiten lassen sich in drei Hauptaufgaben gliedern:

- Herstellung einer Dünnschicht aus Pr:YSO-Einkristall, die auf einen hochreflektierenden optischen Spiegel aufgebracht wurde und für Experimente am KIT genutzt wird.
- Herstellung von Pr:YSO-Wellenleitern für Experimente an der TUDA.
- Entwicklung eines hybriden Yb:YSO/LNOI-Dünnschichtmaterials, Herstellung photonischer Elemente aus diesem Material und Charakterisierung im Hinblick auf das Potenzial für Quantenspeicherung.

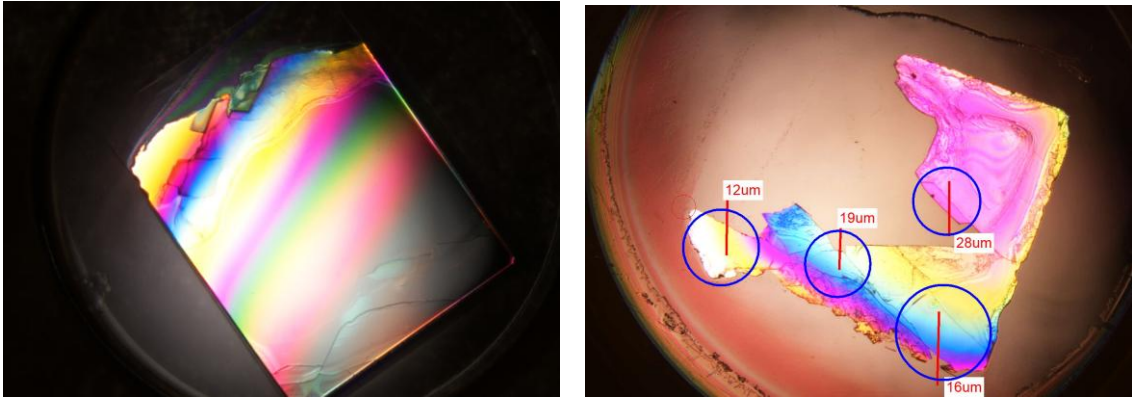


Abb. 1. Lichtmikroskopaufnahmen von mit Pr:YSO funktionalisierten optischen Spiegeln. Die Regenbogenfarben sind ein Interferenzeffekt und rühren von Variationen in der Schichtdicke der Membranen.

Alle drei Aufgaben hängten stark vom Van-der-Waals-Kleben („Bonden“) des Pr:YSO oder der Yb:YSO-Kristalle auf verschiedene Substrate und von der Fähigkeit, diese Schichten auf eine sehr geringe Dicke zu reduzieren, ab. Bereits in der Anfangsphase der Forschung stießen wir auf ein unerwartetes Problem: Kommerziell erhältliche YSO-Kristalle weisen eine erhebliche innere Spannung auf. Diese führte dazu, dass sich die dünnen YSO-Schichten vom Substrat ablösten, sobald ihre Dicke unter 10–15 μm sank. Dieses Problem beeinflusste daher alle drei Aufgaben, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß.

Aufbringen dünner Pr:YSO-Membranen auf optische Spiegel. Diese Aufgabe war am wenigsten betroffen, da die erforderliche Membrandicke im Bereich von 5–10 μm lag. Die Pr:YSO-Kristalle wurden vom KIT-Team bei Scientific Materials Corp. erworben und an die USTUTT geliefert. Die Kristalle wurden mittels CMP (Chemical Mechanical Polishing) poliert, anschließend plasmaaktiviert und auf die ebenfalls vom KIT bereitgestellten Spiegel gebondet. Danach wurden die gebondeten Kristalle bis zur minimal erreichbaren Dicke abgeschliffen und erneut mit CMP poliert.

Auf diese Weise wurden mehrere Pr:YSO-Membranen hergestellt und an das KIT geliefert, um dort in einen faserbasierten Resonator eingebaut zu werden. Beispielbilder von zwei dieser Membranen sind in Abbildung 1 dargestellt. Diese Arbeiten wurden im Rahmen von Arbeitspaket I durchgeführt. Die Teilaufgaben AP I.1 und AP I.2 sind abgeschlossen.

Die Herstellung von Pr:YSO-Wellenleitern für die TUDA war deutlich stärker betroffen, da die erforderliche Dicke einer Pr:YSO-Einkristallmembran unter $1\ \mu\text{m}$ liegen sollte. Es konnte keine zufriedenstellende Lösung gefunden werden, die das Ablösen (Delamination) derart dünner Membranen verhindert, weshalb die Strategie zur Wellenleiterherstellung geändert werden musste. Anstatt dünne Pr:YSO-Plättchen zu fertigen, wurde beschlossen, polierte Pr:YSO-Kristalle mit einer dünnen Schicht eines optischen Materials mit höherem Brechungsindex als YSO zu beschichten – nämlich mit Siliziumnitrid (SiN). Anschließend sollte die SiN-Dünnschicht zu optischen Wellenleitern strukturiert werden, die evaneszent mit den Praseodym-Ionen im

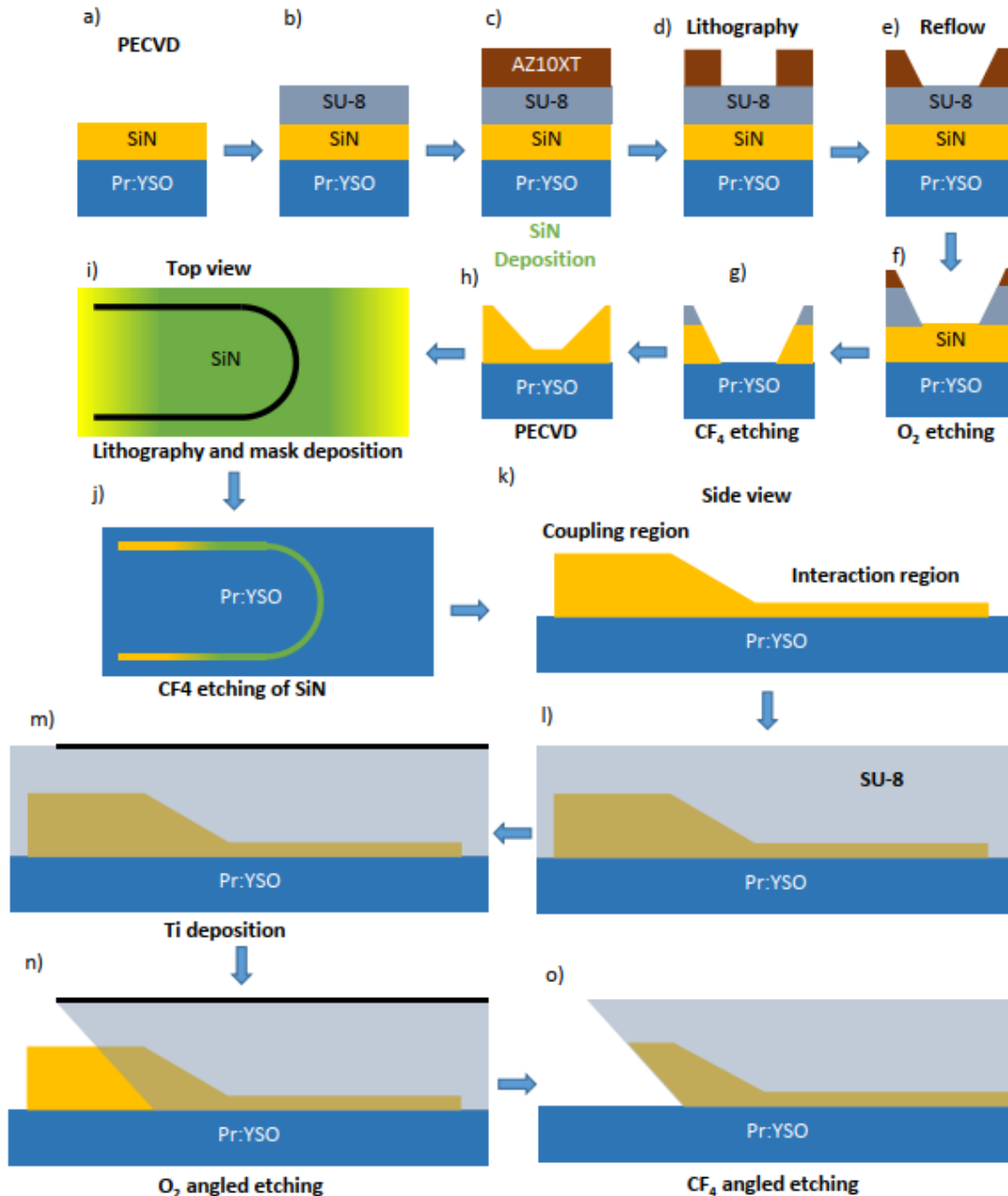


Abbildung 2: Prozessablauf zur Herstellung von SiN-Wellenleitern, die evaneszent an Praseodym-Ionen in Pr:YSO gekoppelt sind.

darunterliegenden YSO-Kristall gekoppelt sind. Ein positiver Aspekt dieses Ansatzes war, dass die Abscheidung des SiN hausintern durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) durchgeführt werden konnte. Allerdings erforderte dies die Entwicklung neuer Prozessprotokolle für zahlreiche Teilschritte, darunter die Abscheidung von SiN auf Pr:YSO, die Elektronenstrahlolithographie auf dem hergestellten Pr:YSO/SiN-Verbund, das Aufdampfen einer Metallmaske mit ausreichender Selektivität für das Plasmaätzen, sowie die Optimierung geeigneter Plasmaätzprozesse. Zusätzlich stellte die TUDA sehr strenge Anforderungen an die Ein- und Auskopplung des Lichts in die Wellenleiter. Die erforderliche numerische Apertur der Ein- und Auskoppler musste bei etwa 0,2 oder darunter liegen. Diese Anforderung ergab sich daraus, dass für die Freistrahllichtkopplung Objektive mit großem Arbeitsabstand außerhalb ihres Kryostaten verwendet werden mussten. Die Entwicklung solcher Wellenleiter nahm erheblich mehr Zeit in Anspruch, als ursprünglich erwartet wurde. Schließlich wurde das folgende Protokoll zur Wellenleiterherstellung entwickelt (siehe Abbildung 2).

Der erste Schritt ist die Abscheidung einer 4 μm dicken SiN-Dünnschicht auf dem polierten Pr:YSO-Kristall. Es folgt das Beschichten, die UV-Belichtung und das Hard-Baking einer dicken

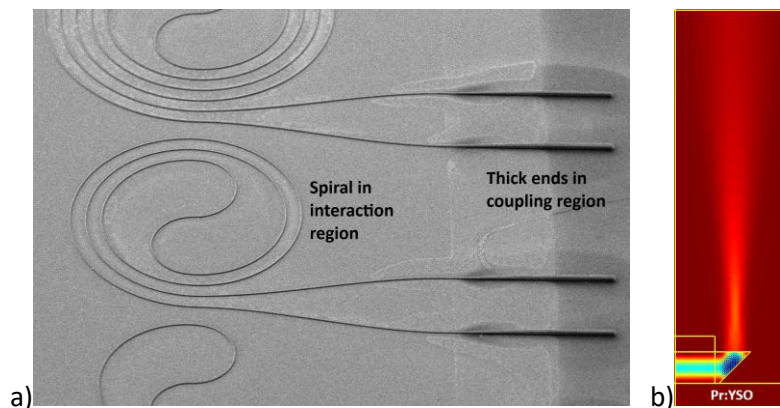


Abbildung 3. a) REM Aufnahme einer SiN Spirale auf Pr:YSO vor dem 45° Unterätzen. b) Simulation der Lichtauskopplung aus einem 45° unterätzten SiN Wellenleiter.

Schicht negativ arbeitenden Photoresists (SU-8). Diese Schicht dient später als Maske zum Ätzen des SiN. Auf das SU-8 wird eine Schicht positiven Photoresists AZ10XT aufgebracht, und mittels optischer Lithographie werden darin große Löcher definiert. Diese Löcher legen später die Wechselwirkungsbereiche zwischen den SiN-Wellenleitern und den Praseodym-Ionen im YSO fest. Die verbleibenden AZ10XT-Bereiche werden bei erhöhter Temperatur in einer Isopropanol-Atmosphäre angeschmolzen, um glatte Kanten zu erzeugen. AZ10XT wird anschließend verwendet, um die SU-8-Schicht mit O_2 -Plasma zu ätzen, wodurch SU-8-Bereiche mit adiabatisch abnehmender Schichtdicke entstehen. Diese SU-8-Struktur dient wiederum als Maske für das CF_4 -Plasmaätzen der SiN-Schicht. Die nicht geätzten SiN-Bereiche werden später als Positionen für die Koppler verwendet, um Licht in die SiN-Wellenleiter einzukoppeln. Der nächste Schritt ist die Abscheidung einer 0,5 μm dicken SiN-Schicht. Diese Dicke gewährleistet eine starke evaneszente Kopplung des Lichts mit den Praseodym-Ionen im YSO in den Wechselwirkungsbereichen zwischen den dicken SiN-Arealen. Die nächsten Schritte sind Elektronenstrahlolithographie zum Schreiben der Wellenleiter, das Aufdampfen einer NiCr-Maske und das Ätzen der SiN-Wellenleiter im CF_4 -Plasma. Die Wellenleiter gehen adiabatisch von den

dicken SiN-Arealen für die Ein-/Aus-Kopplung des Lichts bis zur Oberfläche des Pr:YSO über. Anschließend werden die Wellenleiter mit einer dicken Schicht SU-8 bedeckt, und auf deren Oberfläche wird eine Titanmaske lithographisch definiert, deren Kante über dem dicken Teil des Wellenleiters positioniert ist. Schräges Plasmaätzen in Sauerstoffatmosphäre erzeugt eine SU-8-Maske für das weitere schräge Ätzen des SiN-Kopplers. Schließlich wird das dicke Ende des Wellenleiters unter einem Winkel von 45° unterätzt, um einen Koppler basierend auf totaler interner Reflexion zu bilden, dessen numerische Apertur entsprechend den Anforderungen der TUDA unter 0,2 liegt.

Ein beispielhaftes Rasterelektronenbild (REM) der Wellenleiter vor der letzten SU-8-Beschichtung ist in Abbildung 3a gezeigt. Nach dem beschriebenen Fertigungsprotokoll konnten spiralförmige Wellenleiter mit einer Länge von bis zu 7 mm und einer Transmission von etwa 25 % hergestellt werden. Die gefertigte Wellenleiterprobe wurde auf einen speziell entworfenen Probenhalter montiert und an die TUDA gesendet.

Natürlich wurde das oben beschriebene Fertigungsprotokoll anhand zahlreicher Tests verschiedener Wellenleitergeometrien, Maskenmaterialien und Ätzparametern entwickelt. Daher war die Entwicklung des Protokolls und die Herstellung der Wellenleiterprobe außerordentlich zeitaufwendig. Dies führte dazu, dass nur begrenzte Zeit für die Produktion des Hybridmaterials blieb.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen von Arbeitspaket I durchgeführt. Die Teilaufgabe AP I.3 ist abgeschlossen, jedoch mit einem anderen Materialsystem.

Entwicklung seltenerd-dotierter Hybridmaterialien auf Basis von LNOI. Diese Aufgabe war ebenfalls stark betroffen von der Tatsache, dass YSO-Kristalle, die auf LNOI gebondet (Van-der-Waals-Kleben) worden sind, nicht auf wenige Hundert Nanometer Dicke reduziert werden können. Um dieses Problem zu umgehen, mussten wir uns darauf konzentrieren, ein alternatives, kernspinfreies Material als Wirtsmaterial für Seltenerd-Ionen zu finden. Das Material der Wahl

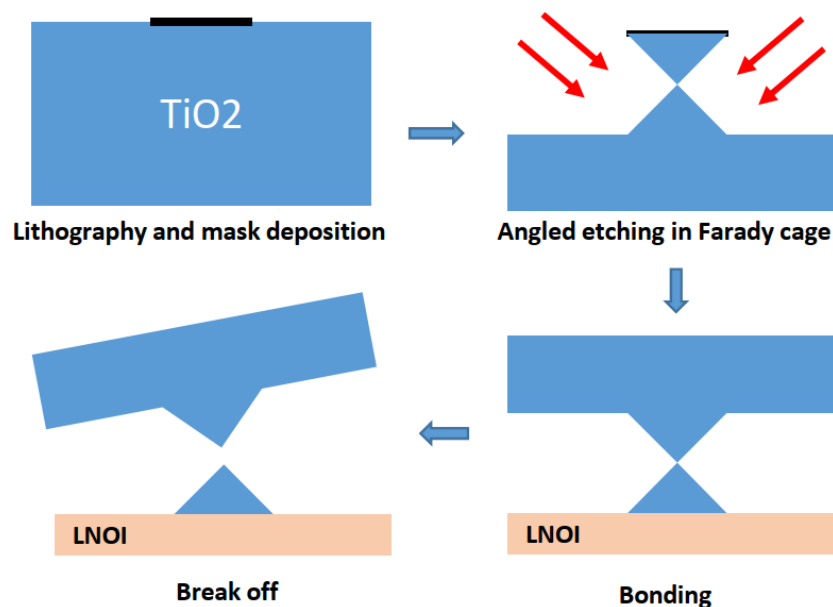


Abbildung 4. Prozessablauf zur Herstellung von hybriden photonischen Elementen

ist TiO_2 in seiner Rutil-Phase. Hervorragende spektroskopische Eigenschaften von in TiO_2 implantierten Seltenerd-Ionen (insbesondere Erbium) wurden in der Arbeit von Thompson et al. [Nano Letters, 19(12), 8928–8933 (2019)] gezeigt. Unsere eigenen Versuche, eine TiO_2 -Dünnschicht mittels Ionen-Slicing-Technik (bekannt als Smart Cut) herzustellen, waren jedoch erfolglos. Andererseits ist TiO_2 im Gegensatz zu YSO ein Material, das sich sehr einfach richtungselektiv mit fluorhaltigem Plasma ätzen lässt. Dies eröffnet die Möglichkeit, freistehende photonische Elemente (Wellenleiter und photonische Kristallresonatoren, PCCs) direkt auf der Oberfläche des TiO_2 -Kristalls zu fertigen und diese vorgefertigten Elemente anschließend auf LNOI zu transferieren. Die folgende Technik zur Herstellung hybrider TiO_2 /LNOI-photonischer Elemente wurde daher entwickelt.

Als Ausgangsmaterial werden kommerziell erhältlichen TiO_2 -Kristalle mit einer Oberflächenrauheit von $<0,2$ nm verwendet. Die Masken der photonischen Elemente werden mittels Elektronenstrahlolithographie geschrieben, gefolgt von NiCr-Aufdampfen und anschließendem Lift-off. Die Wellenleiter und PCCs werden anschließend in einem Faraday-Käfig schräg geätzt, bis die Strukturen nur noch durch dünne Stützstrukturen auf der Oberfläche des TiO_2 -Kristalls gehalten werden. Nach dem Entfernen der Maske und der Oberflächenaktivierung sowohl der TiO_2 -Nanostrukturen als auch der LNOI-Oberfläche werden die photonischen Elemente auf LNOI gebondet und anschließend von den Stützstrukturen abgetrennt. Der Ablauf des Prozesses ist in Abbildung 4 dargestellt.

Beispielhafte Ergebnisse des oben beschriebenen Protokolls sind in Abbildung 5a gezeigt. Diese PCCs wurden auf x-cut LNOI gebondet, wobei die Ausrichtung der PCCs senkrecht zur z-Achse von LNOI liegt. Dadurch ist es möglich, die Resonanz der PCCs durch das Anbringen von Elektroden parallel zu den PCCs abzustimmen und den elektro-optischen Effekt zur Feinabstimmung zu nutzen. Die erwartete Abstimmbarkeit ergibt sich aus der Änderung des Brechungsindex von LNOI in Abhängigkeit vom angelegten elektrischen Feld: $\Delta n = -n^3/2 r_{33} E$. Der elektro-optische Koeffizient $r_{33} = 30$ pm/V ermöglicht die Abschätzung der relativen Änderung des Brechungsindex, die direkt proportional zur relativen Verschiebung der PCC-Frequenz ist: $\Delta n/n = -n^2/2 r_{33} E = -\alpha E$, wobei $\alpha = 6,8 \times 10^{-5} (\text{V}/\mu\text{m})^{-1}$ gilt. Für Lichtwellenlängen um $1 \mu\text{m}$ entspricht dies einer Abstimmrate von ≈ 20 GHz/(V/ μm). Diese Effizienz wird allerdings durch das Verhältnis bestimmt, in dem sich der Modenanteil zwischen LNOI und TiO_2 aufteilt. Da der Brechungsindex von TiO_2 wesentlich höher ist als der von LNOI, befindet sich der Großteil der Resonatormode in TiO_2 .

Die Q-Faktoren der TiO_2 -PCCs, die auf LNOI gebondet wurden, wurden durch Abstimmen eines Single-Mode-Lasers im Bereich der Resonanzfrequenz charakterisiert. Die resultierenden

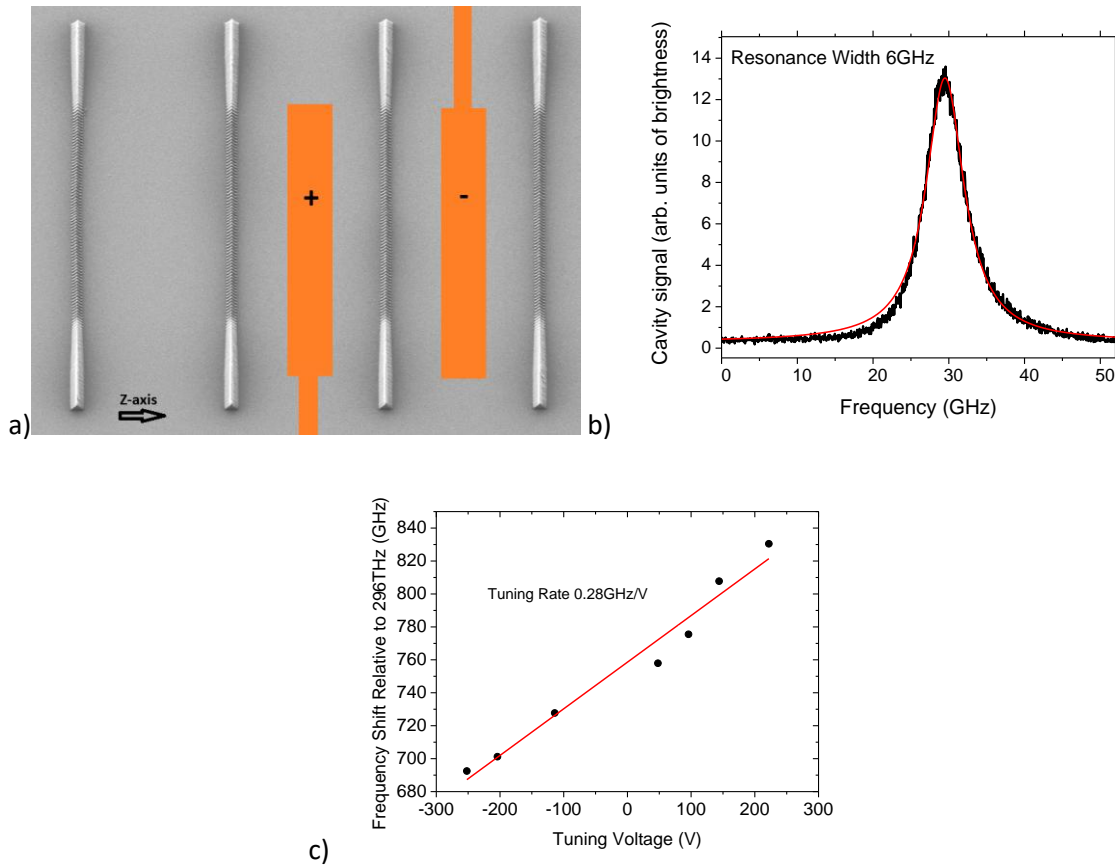


Abbildung 5. a) REM Aufnahme von auf LNOI gebondeten TiO_2 PCCs. Positionen der Tuning-Elektroden sind markiert. b) PCC Resonanzform. c) PCC Resonanzfrequenz als Funktion der Spannung.

Resonanzbreiten lagen bei bis zu 6 GHz, was Q-Faktoren von 5×10^4 entspricht (siehe Abbildung 5b). Der maximale Abstimmungsbereich betrug rund 140 GHz bei einer Abstimmrate von 0,28 GHz/V.

Ein weiterer Aspekt bei der Entwicklung eines seltenerd-basierten Hybridmaterials für Quantenanwendungen ist die Aktivierung des kernspinfreien Wirtsmaterials mit Seltenerd-Ionen. Zwei unterschiedliche Methoden der Aktivierung wurden untersucht, wovon waren erfolgreich waren. Die erste Methode ist die Implantation von TiO_2 -Einkristallen mit Erbium-Ionen. Erbium wurde aus zwei Gründen gewählt: Diese Methode zur Aktivierung von TiO_2 wurde bereits berichtet [Nano Letters, 19(12), 8928–8933 (2019)] und Erbium emittiert Photonen im Telekommunikationsbereich, was für potenzielle Quantenanwendungen vorteilhaft ist. Die Implantation wurde in der Arbeitsgruppe von Georgy Astakhov am Helmholtz-Zentrum in Dresden durchgeführt. Die Implantationsdosis betrug $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ bei einer Ionenenergie von 500 keV. Nach der Implantation wurde das TiO_2 24 Stunden lang bei 1200 °C in Luft getempert. Das optische Erbium-Signal der Probe war zu schwach, um es durch direkte Anregung im konfokalen Mikroskop zu detektieren, da das Erbium-Ensemble zu klein war. Um das Signal zu verstärken, wurden lange freistehende Wellenleiter auf der Kristalloberfläche durch schräges Plasmaätzen

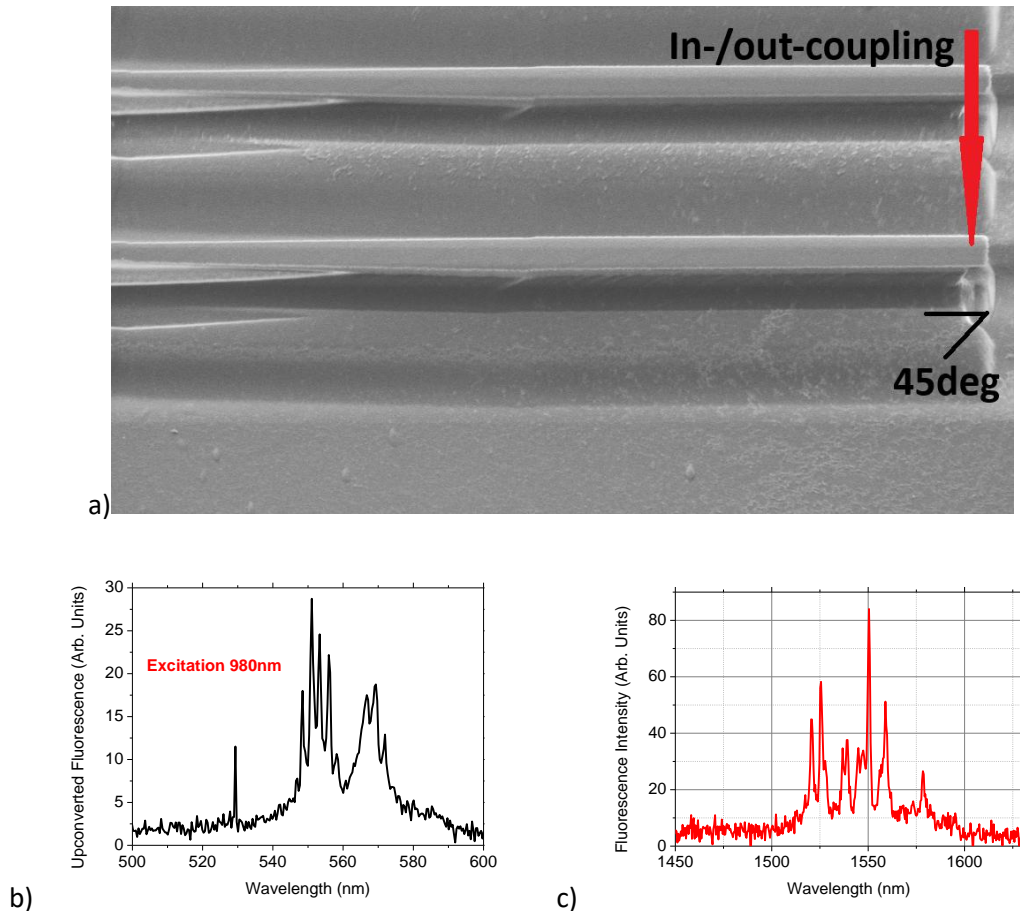


Abbildung 6. a) REM-Aufnahme von mit Erbium-Ionen aktivierten TiO_2 -Wellenleitern. b) Hochkonvertiertes Erbium-Signal bei 980 nm Laseranregung. c) Herunterkonvertiertes Signal im Telekommunikationswellenlängenbereich bei 980 nm Laseranregung.

bei 45° hergestellt. Auf diese Weise kann das Erbium-Signal über die gesamte Länge des Wellenleiters gesammelt werden. Die Wellenleiter standen auf dünnen Stützstrukturen, ähnlich wie bei der Herstellung der PCCs. Das REM-Bild der Wellenleiter ist in Abbildung 6a gezeigt. Die Enden der Wellenleiter wurden unter einem Winkel von 45° unterätzt, um durch Totalreflexion im Inneren die Signalsammlung weiter zu verbessern. Die spektroskopischen Ergebnisse sind in Abbildungen 6b und 6c dargestellt. Die Spektren wurden bei 980 nm Laseranregung aufgenommen; sowohl das hochkonvertierte Signal (ca. 550 nm) als auch das herunterkonvertierte Signal (ca. 1550 nm) sind gezeigt.

Die zweite Methode zur Aktivierung von TiO_2 ist die Erbium-Diffusion bei 1400°C . Dazu wurde eine stark verdünnte Lösung von $\text{Er}(\text{NO}_3)_3$ auf die TiO_2 -Oberfläche aufgetragen und getrocknet. Die Erbium-Diffusion erfolgte durch Tempern in Luft bei 1400°C über 99 Stunden. Ähnlich wie beim implantierten TiO_2 wurden auch hier freistehende Wellenleiter auf der Kristalloberfläche gefertigt. Die spektroskopischen Ergebnisse sind sehr ähnlich denen des implantierten Erbiums. Dies zeigt, dass beide Methoden der Aktivierung von TiO_2 mit Seltenerd-Ionen funktionieren.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen von Arbeitspaket II durchgeführt. Beide Aufgaben – die Herstellung hybrider PCCs sowie deren Charakterisierung in Bezug auf Q-Faktoren und elektrische Abstimmbarkeit – sind abgeschlossen. Allerdings war, wie aus dem oben Beschriebenen hervorgeht, der erfolgreiche Ansatz vollständig anders als ursprünglich geplant.

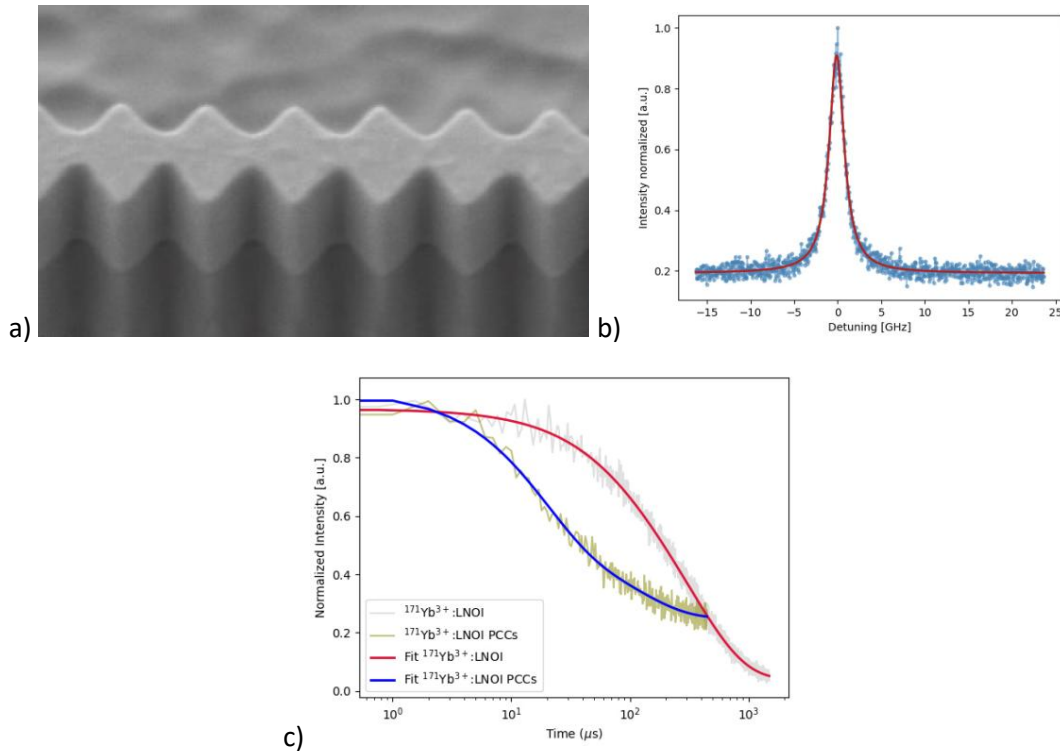


Abbildung 7. a) Vergrößerte REM Aufnahme eines LNOI PCC zeigt hohe Prozessqualität. b) Q-Faktoren bis zu 3×10^5 in Resonatoren mit Modenvolumina um $10(\lambda/n)^3$ wurden erreicht. c) 20-fache Reduktion der optischen Lebensdauer von Ytterbium durch Purcell-Verstärkung gemessen.

Da zu viel Zeit in die Herstellung der Wellenleiter für TUDA investiert wurde, blieb nicht genügend Zeit, um die Entwicklung hybrider photonischer Elemente im Rahmen von NEQSiS weiter voranzutreiben. Insbesondere hatten wir nicht genügend Zeit, um einzelne Seltenerd-Ionen in hybriden PCCs zu detektieren und sie als Einzelphotonenquellen zu implementieren. Ebenso fehlte die Zeit, um optische Speicherung in Seltenerd-Ensembles in PCCs zu demonstrieren. Daher wurden die Aufgaben des Arbeitspakets III nicht abgeschlossen.

Nebenresultate zur Purcell-Verstärkung von Ytterbium-Ionen in LNOI PCCs. Zusätzliche Ergebnisse, die nicht direkt mit den Zielen des Projekts in Zusammenhang stehen, wurden mit Ytterbium-Ionen erzielt, die direkt in LNOI implantiert wurden. Da Lithium und Niob Kernspins mit großem magnetischem Moment besitzen, dient diese Arbeit nicht unmittelbar dem Ziel der Erzeugung langlebiger Speicher. Sie zeigt jedoch die Fähigkeit zur Herstellung von PCCs mit kleinem Modenvolumen und hohem Q-Faktor, was zu einer starken Purcell-Verstärkung führt.

Z-cut LNOI-Proben wurden mit ^{171}Yb -Ionen am Rubion in Bochum implantiert. Nach der Implantation wurden die Proben thermisch getempert, um das Ytterbium im korrekten Ladungszustand zu stabilisieren und den Implantationsschaden zu reduzieren.

Die LNOI-PCCs wurden zunächst mit kommerzieller Simulationssoftware berechnet. Da LNOI ein sehr hartes Material ist, das nur schwer durch reaktives Ionenätzen bearbeitet werden kann, wurde die Geometrie an die Anforderungen des Plasmaätzens angepasst. Sie wurde als Wellenleiter mit gewellten Seitenwänden gewählt. Die entwickelten PCCs wurden durch eine Kombination aus Elektronenstrahlolithographie, Metallmaskenabscheidung und anschließendem reaktiven Ionenätzen hergestellt. REM-Bilder der resultierenden PCCs sind in Abbildung 7a dargestellt.

Die Qualitätsfaktoren der gefertigten PCCs wurden bestimmt, indem die Wellenlänge eines abstimmbaren Single-Mode-Diodenlasers über die Resonanz des Resonators gefahren wurde. Resonanzbreiten von nur 1 GHz wurden gemessen, was auf Q-Faktoren von bis zu 3×10^5 hinweist. Ein Beispielsignal eines Resonators ist in Abbildung 7b gezeigt.

Experimente zur Bewertung der Purcell-Verstärkung der Ytterbium-Emission wurden in einem selbstgebauten Tieftemperaturmikroskop bei einer Temperatur von 3,3 K durchgeführt. Purcell-verstärkte Fluoreszenzlebensdauern von nur 18 μs wurden gemessen, während die Lebensdauer im Volumenmaterial 360 μs betrug (siehe Abbildung 7c). Somit wurde eine Purcell-Verstärkung um den Faktor 20 nachgewiesen.

3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (Beträge auf 1 € gerundet)

Personalmittel (Position 0812)

Beantragt wurden 27 PM Personalmittel für eine Doktorandin (E13 75%): 166.432€

Zusätzlich wurde Investitionsmittel in Personalmittel umgewandelt: 38.334 €

Damit standen Personalmittel in Höhe von 204.766€ zur Verfügung.

Ausgegeben wurden: 196.741€.

Gegenstände bis 410€ (Position 0831)

Für diese Position waren ursprünglich keine Fördermittel beantragt worden.

Wir haben für den Kauf eines Time Taggers 952,00€ aus Investitionsmitteln umwidmen lassen.

Verbrauchsmaterial: (Position 0843)

Hierfür waren ursprünglich 25.626,00€ beantragt worden.

Ausgegeben wurden: 20.964€

Dienstreisen: (Position 0846)

Für Dienstreisen wurden Fördermittel in Höhe von 8400€ beantragt.

Ausgegeben wurde: 362€

Investitionen: (Position 0850)

Ursprünglich beantragt wurden: 82.298€

Ausgegeben haben wir: 43.044€

In dieser Position gab es einige Umwidmungen da der Arbiträrgenerator nicht benötigt wurde, dafür aber mehrere Kleingeräte. Ein Teil der Investitionsmittel wurde außerdem in Personalmittel umgewandelt. Um einen wissenschaftlichen Mitarbeiter über die Projektverlängerungsphase finanzieren zu können.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die physikalische Realisierung von Quantentoken basiert auf skalierbarer und vollständig kontrollierbarer Hardware. Die Hauptkomponente von Quantentoken ist ein langlebiger

Quantenspeicher. Das Projekt führte zur Entwicklung einer skalierbaren Technologie zur Integration elektrisch steuerbarer Quantenknoten (einschließlich Quantenspeicher), die auf einem kernspinfreien Wirtsmaterial basieren, das mit Seltenerd-Ionen dotiert ist. Daher steht die oben beschriebene Arbeit im Einklang mit der Realisierung von Quantentoken. Leider erlaubten unerwartete technische Schwierigkeiten und der begrenzte Zeitrahmen des Projekts keine experimentelle Erprobung des On-Chip-Quantenspeichers.

5. Erläuterungen zum während Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach unserem besten Wissen gibt es nur eine Arbeit [Optics Express 29, 15497 (2021)], die die Vorteile von Seltenerd-Ionen in einem kernspinfreien Wirtsmaterial mit den elektrooptischen Eigenschaften von dünnen Lithiumniobat-Filmen kombiniert. In dieser Arbeit wurde ein Er:YSO-Kristall direkt an vorgefertigte photonische LNOI Strukturen gebondet. Dieser Ansatz unterscheidet sich von dem im aktuellen Projekt verfolgten.

6. Fortschreibung des Verwertungsplans

Die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse des Projekts war in erster Linie mit der Ausbildung junger Spezialisten auf dem Gebiet der Quantenoptik verbunden. Das Projekt führte zu einer Doktorarbeit von Fiammetta Sardi, die 2024 verteidigt wurde. Zwei Bachelor- und eine Masterarbeit waren ebenfalls Ergebnisse des Projekts. Außerdem wurden Teile der Projektergebnisse in den Konferenzberichten der SPIE veröffentlicht [SPIE Proceedings Volume 12911, Quantum Computing, Communication, and Simulation IV; 129110X (2024)].

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Technologie wird derzeit im LichtBriQ-Projekt eingesetzt. Es handelt sich um ein Kooperationsprojekt mit der Industrie, das teilweise vom BMFTR finanziert wird. Lithiumniobat auf Isolator (LNOI) wird zunehmend zu einem sehr beliebten Material für nichtlineare und quantenoptische Anwendungen, während der monopolistische Lieferant von LNOI das chinesische Unternehmen NanoLN ist. Das LichtBriQ-Projekt hat das Ziel, eine deutsche Unabhängigkeit in der Produktion und Nutzung dieses Materials zu etablieren. Die im Rahmen von NEQSiS gesammelten Erfahrungen sind von unschätzbarem Wert für die Verwirklichung der Ziele von LichtBriQ.

7. Publikationen

F. Sardi, V. Foteinou, R. Stöhr, R. Kolesov, J. Wrachtrup, SPIE Proceedings Volume **12911**, Quantum Computing, Communication, and Simulation IV; 129110X (2024)

PHOTONIC INTEGRATION OF ^{171}Y TTTERBIUM SINGLE PHOTON SOURCES INTO AN LNBO_3 BASED PHOTONIC PLATFORM

Fiammetta Sardi^{*a}, Varvara Foteinou^b, Rainer Stöhr^{ac}, Roman Kolesov^{ac}, Jörg Wrachtrup^{ac}

^a3rd Physics institute, University of Stuttgart, Allmandring 13,70569 Stuttgart, Germany;

^bRUB-Central Unit for Ions Beams and Radio Nuclides, Ruhr-University Bochum, Universitätsrasse
150, 44801 Bochum, Germany;

^cCenter for applied quantum technologies, University of Stuttgart, Allmandring 13,70569 Stuttgart,
Germany;

ABSTRACT

The necessity for scalable, reliable and reproducible quantum systems is raising in the time for appealing potentialities in application of this technology. On-chip photonic solutions are a leading competitor by combining established classical fabrication technologies, integrated photonics and quantum optical effects. Lithium Niobate on insulator (LNOI) is one of the main contenders for the integration of on-chip functionality. Rare Earth Ions (REI) already proved many different good properties in term of optical and spin features as well as good integration through implantation. In particular, ^{171}Y tterbium showed to have clock transitions in the zero phonon line at zero field which would screen magnetic noise from high spin materials. Here the possibility to create a reconfigurable interferometer on-chip by the employment of fabrication techniques has been showed with the creation of LN structures, interconnecting infrastructure and far field coupling from SU8 resist. Moreover, doping Lithium niobate photonic crystal cavities has been investigated to be employed as switchable single photon sources.

Keywords: on chip integration, SU8, Photonic crystal cavities, LNOI, Ytterbium.

1. INTRODUCTION

In the hunt for scalable, reliable and reproducible quantum systems, on-chip photonic solutions are a leading competitor by combining established classical fabrication technologies, integrated photonics and quantum optical effects. Lithium Niobate on insulator (LNOI) is one of the main contenders for the integration of on-chip functionality, from single photon sources to detector. The integration of photonic structures as beam splitter, phase shifter or lasers on-chip has already been demonstrated as scalable and reliable path to achieve this goal^{1,2}. Single photon sources and memories on-chip is one of the next challenges to overcome to eventually achieve a quantum system on chip photonics. Rare Earth Ions (REI) already proved many different good properties in term of optical³ and spin⁴ characteristics. In particular, they have a coherence time that can reach 6 h^5 , at low temperature their optical transition is narrow and they could be easily integrated on different REI materials without losing the advantages that they exhibited^{6,7,8}. In particular, an interesting species belonging to the REI group, close to the telecommunication wavelength and having a clock transition is the isotope ^{171}Y tterbium^{9,10} (Yb). The presence of a clock transition reduces the magnetic noise of the transition, particularly important for a material with a strong spin bath, as LN for the presence of Niobium (Nb). $^{171}\text{Yb}^{3+}$ has, moreover, lowest possible no zero electronic and nuclear spin ($S=1/2$ $I=1/2$), simplifying the optical and spin spectra and making possible optical manipulation of the hyperfine levels. In addition, it has already been demonstrated to be integrated in photonics structures employed as a quantum memory¹¹. The integration of $^{171}\text{Yb}^{3+}$ and LN photonic crystal cavities would present solution for fabrication error for LNOI structures by its tunability (linear electro-optic effect), and would create fast switchable and on demand single photon sources. Here an integration of $^{171}\text{Yb}^{3+}$ ions integrated through implantation in

*f.sardi@pi3.uni-stuttgart.de;

Quantum Computing, Communication, and Simulation IV, edited by Philip R. Hemmer,
Alan L. Migdall, Proc. of SPIE Vol. 12911, 129110X · © 2024 SPIE
0277-786X · doi: 10.1117/12.3001722

Proc. of SPIE Vol. 12911 129110X-1

Stuttgart, 29.10.2025

Dr. R. Kolesov

