

Halbleitertechnologie von A bis Z

Oxidation

Bauelementisolation	3
<i>Grabenisolation</i>	3
<i>Höchstintegration auf Chips</i>	4
<i>Der Vogelschnabel</i>	5

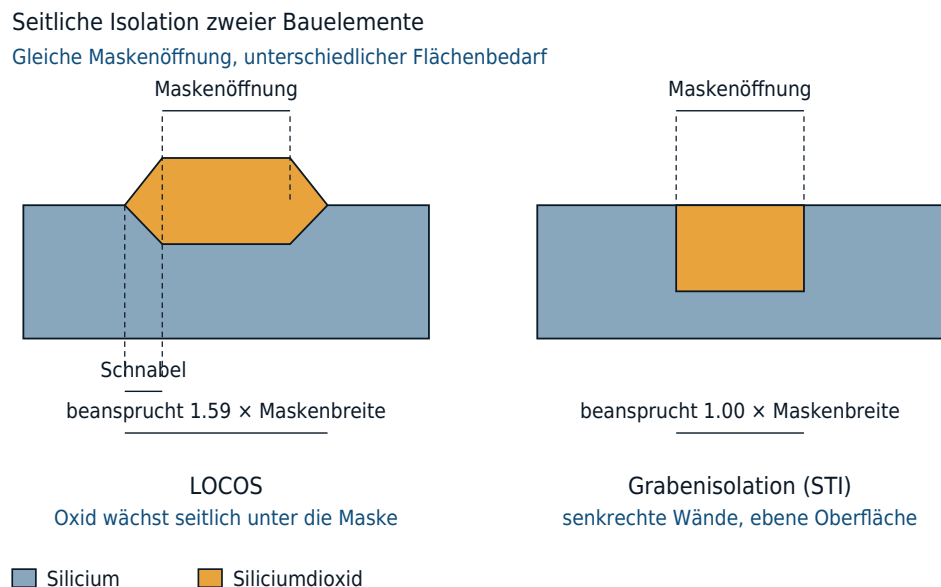
Bauelementisolation

Grabenisolation

Die lokale Oxidation stößt bei kleinen Strukturen an ihre Grenze: Der Vogelschnabel wird nicht kleiner, wenn die Bauelemente es werden. Er beansprucht eine feste Länge, die sich aus der Dicke von Padoxid und Nitrid ergibt, und verbraucht damit einen immer größeren Anteil der verfügbaren Fläche. Unterhalb einer Strukturgröße von etwa einem halben Mikrometer wurde das Verfahren dadurch unbrauchbar.

An seine Stelle ist die Grabenisolation getreten (engl. shallow trench isolation, STI). Statt das Oxid aufwachsen zu lassen, wird ein Graben in das Silicium geätzt und mit Oxid gefüllt. Die Isolation ist damit genau so breit wie die Maskenöffnung, und die Oberfläche bleibt eben.

Vergleich der beiden Verfahren



Ablauf

Die Grabenisolation ist einer der ersten Schritte der gesamten Fertigung; sie wird angelegt, bevor irgendein Bauelement entsteht.

1. Auf dem Wafer werden ein dünnes Padoxid und darüber eine Siliciumnitridschicht aufgebracht. Das Nitrid dient später als Stopp beim Polieren.

2. Über eine Lackmaske werden Nitrid, Padoxid und das darunterliegende Silicium **anisotrop geätzt**. Die Gräben erhalten dabei bewusst leicht schräge Wände, damit sie sich anschließend besser füllen lassen.
3. Eine kurze thermische Oxidation rundet die scharfen Kanten am Grabenrand ab und beseitigt die Ätزشäden an der Grabenwand. Scharfe Kanten würden das elektrische Feld überhöhen und die Einsatzspannung des benachbarten Transistors verfälschen.
4. Der Graben wird mit Oxid gefüllt. Da er schmal und tief ist, kommen dafür Verfahren zum Einsatz, die keinen **Hohlraum** hinterlassen.
5. Das überschüssige Oxid wird durch **chemisch mechanisches Polieren** abgetragen, bis das Nitrid freiliegt.
6. Das Nitrid wird nasschemisch in heißer Phosphorsäure entfernt, das Padoxid in Flusssäure. Zurück bleiben ebene Siliciumflächen, umgeben von Oxid.

Der Preis für die kompaktere Isolation ist die Zahl der Schritte: Wo LOCOS mit Maskieren und Oxidieren auskam, sind hier Ätzen, Füllen, Polieren und zwei Nassprozesse nötig. Ohne das chemisch mechanische Polieren wäre das Verfahren gar nicht möglich – erst damit lässt sich das Füllmaterial sauber auf die Höhe der Siliciumoberfläche zurücknehmen.

Weitere Bauformen

Die Tiefe der Gräben richtet sich danach, was voneinander getrennt werden soll. Zur Trennung benachbarter Transistoren genügen einige hundert Nanometer. Sollen dagegen ganze Schaltungsteile gegeneinander isoliert werden, etwa in der Leistungs- und Analogtechnik oder um empfindliche analoge Bereiche vor Störungen aus dem digitalen Teil zu schützen, werden mehrere Mikrometer tiefe Gräben angelegt (engl. deep trench isolation).

Bei Bauelementen mit senkrecht stehenden Kanälen verliert selbst die Grabenisolation ihre Rolle als flächenbestimmender Faktor: Dort trennt nicht mehr ein Graben zwischen zwei nebeneinanderliegenden Gebieten, sondern die Bauelemente stehen ohnehin frei.

Höchstintegration auf Chips

In der Halbleitertechnik werden Strukturen mittels Belichtungs- und Ätzverfahren erzeugt. Dabei entstehen Stufen, an denen sich Fotolack ansammeln kann und so das Auflösungsvermögen in der Fototechnik verringert wird. Bei einer isotropen Ätzcharakteristik (der Abtrag erfolgt sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung) müssen Lackmasken angepasst werden, damit unterätzte Strukturen am Ende des Ätzprozesses die richtigen Abmessungen besitzen.

An diesen Stufen treten auch Probleme bei der Metallisierung auf, da die Leiterbahnen hier verengt werden, so dass Schäden durch [Elektromigration](#) die Folge sind.

Um eine hohe Packungsdichte zu erreichen, also möglichst viele Bauelemente auf möglichst geringer Fläche unterzubringen, müssen die Stufen und Unebenheiten vermieden werden. Die erste Antwort darauf war die LOCOS-Technik: LOCal Oxidation of Silicon (Lokale Oxidation von Silicium). Sie prägte den Aufbau integrierter Schaltungen über zwei Jahrzehnte und ist bis heute in der Leistungs- und Analogtechnik anzutreffen.

Für feine Strukturen reicht sie jedoch nicht mehr aus. Warum das so ist, zeigt sich an ihrem charakteristischen Nebeneffekt, der im folgenden Abschnitt beschrieben wird; die heute übliche [Grabenisolation](#) vermeidet ihn.

Der Vogelschnabel

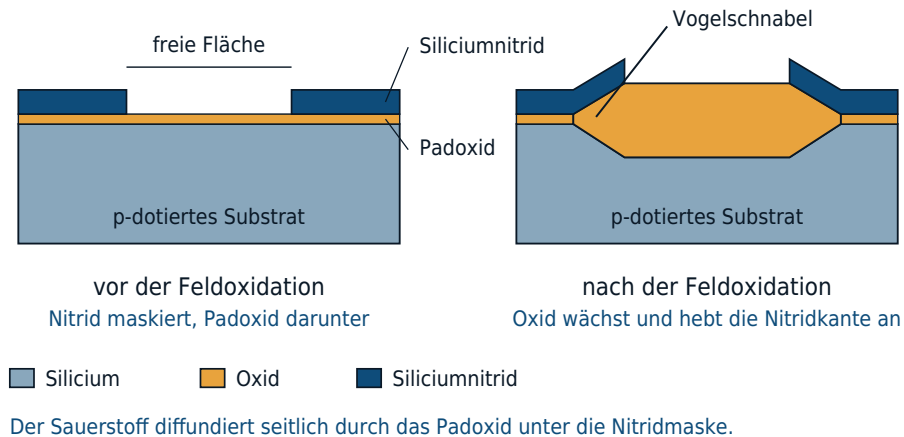
Bei der LOCOS-Technik nutzt man die unterschiedlichen Oxidationsgeschwindigkeiten von Silicium und Siliciumnitrid zur lokalen Maskierung der Scheibenoberfläche aus.

Mit einer Siliciumnitridschicht maskiert man die Stellen an denen kein Oxid aufwachsen soll, es bildet sich nur eine Oxidschicht auf den Nitrid freien Bereichen. Da Silicium und Siliciumnitrid unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten besitzen, wird eine dünne Schicht Oxid, das Padoxid, zwischen Nitridmaske und Substrat aufgebracht um Spannungen durch Temperaturänderungen zu vermeiden.

Zur seitlichen Isolation von Transistoren bringt man nun ein Feldoxid (FOX) auf der freien Siliciumoberfläche auf. Während sich bei der Feldoxidation auf dem Silicium eine Siliciumdioxidschicht bildet, verursacht das Padoxid eine seitliche Sauerstoffdiffusion unter die Nitridmaske und somit ein leichtes Oxidwachstum am Rand der Maskierung. Der Oxidausläufer hat die Form eines Vogelschnabels, dessen Länge vom Oxidationsprozess, sowie von der Dicke des Nitrids und des Padoxids abhängt.

LOCOS: vor und nach der Feldoxidation

Das Oxid wächst nur dort, wo das Nitrid die Oberfläche freilässt



(Quelle: Consiglio Nazionale delle Ricerche)

Neben diesem Effekt, der bis zu 1 µm der Fläche für Bauelemente einnehmen kann, tritt bei einer feuchten Oxidation außerdem der so genannte White-Ribbon- oder Kooi-Effekt auf. Dabei reagiert Nitrid aus der Maskierschicht mit Wasserstoff zu Ammoniak NH_3 , der zur Siliziumoberfläche diffundiert und dort zu einer Nitridation führt. Vor der **Gateoxidation** muss dieses Nitrid entfernt werden, da es sonst als Maskierung wirkt.

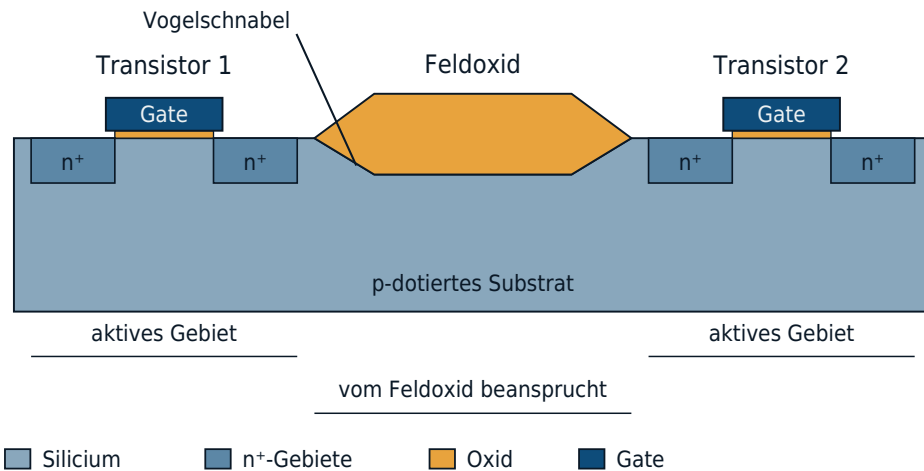
Trotz dieser negativen Effekte ist die LOCOS-Technik ein geeignetes Verfahren um die hohe Packungsdichte zu ermöglichen. Auf Grund der geringeren Unebenheit ohne Kanten- und Stufenbildung wird die Auflösung in der Fototechnik verbessert. Das Feldoxid lässt sich noch etwas zurückätzen, dadurch wird zwar das aufgewachsene Oxid leicht reduziert, die Länge des Vogelschnabels nimmt jedoch ab und die Oberfläche wird wiederum etwas mehr eingeebnet. Dies wird als *fully recessed LOCOS* bezeichnet.

Der Vogelschnabel ist trotzdem der Punkt, an dem das Verfahren scheitert. Seine Länge hängt von der Dicke des Padoxids und des Nitrids ab, nicht von der Größe der Strukturen. Er schrumpft also nicht mit, wenn die Bauelemente kleiner werden. Solange die Isolationsgebiete mehrere Mikrometer breit waren, fiel ein Ausläufer von einigen zehntel Mikrometern kaum ins Gewicht; bei Strukturen unterhalb eines halben Mikrometers verbraucht er den größten Teil der Fläche, die er isolieren soll. Dünneres Padoxid würde ihn verkürzen,

überträgt dann aber die Spannungen der Nitridmaske ungedämpft auf das Silicium und erzeugt Kristallfehler.

LOCOS zur Isolation zweier Transistoren

Das Feldoxid trennt die aktiven Gebiete voneinander



Ohne Feldoxid stünden beide Transistoren über das Substrat in Verbindung.
Der Vogelschnabel kostet Fläche, die für Bauelemente ausfällt.