

۳۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۹۹۹



دانشگاه شهید بهشتی
پژوهشکده لیزر و پلاسما

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فوتونیک

عنوان:

بررسی زدایش ناهمسانگرد سیلیکون با محلول قلیایی KOH

دانشجو:

عاطفه احمدلو

استاد راهنما:

دکتر حمید لطیفی

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

موسسه اطلاعات درک علمی بزرگ
تسبیه درک

تاریخ دفاع

شهریور ۸۸

۱۲۹۴۴۴



دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ
شماره
پوست

بسمه تعالی

«صور تجلسه دفاع از پایان نامه دانشجویان دوره کارشناسی ارشد»

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین

تلفن ۶۹۹۰۱

بازگشت به مجوز دفاع شماره ۹۵۳۵/۲۰۰۲/د مورخ ۸۸/۶/۲۰ جلسه هیأت داوران
ارزیابی پایان نامه خانم عاطفه احمدلو به شماره شناسنامه ۴۳۰۶۱ صادره از تهران متولد
۱۳۶۰ دانشجوی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته رشته فوتونیک با عنوان:

«بررسی خوردگی ناهمسانگرد سلیکون در محلول قلیایی KOH»

به راهنمایی: دکتر حمید لطیفی

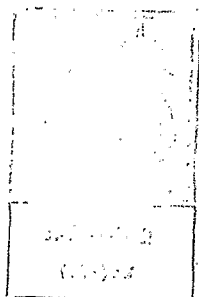
طبق دعوت قبلی در تاریخ ۸۸/۶/۲۴ تشکیل گردید و براساس رأی هیأت داوری و با عنایت
به ماده ۲۰ آئین نامه کارشناسی ارشد مورخ ۷۵/۱۰/۲۵ پایان نامه مزبور با نمره ۳۰٪
و درجه ۳ (مورد تصویب قرار گرفت).

۱- استاد راهنما: دکتر لطیفی

۲- استاد مشاور: -----

۳- استاد داور داخل و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر قمی

۴- استاد داور: دکتر شاه آبادی



تقدیم به:

مادر عزیز و

همسر مهربان و همیشه صبورم

تشکر و قدردانی

به نام تو ای یگانه هستی بخش که قلم را قداست و انسان را کرامت بخشیده‌ای

در آغاز لازم می‌دانم از زحمات استاد گرامی جناب آقای دکتر حمید لطیفی که با راهنمایی‌های خود راهگشای اینجانب بوده‌اند تشکر و قدردانی نمایم.

بر خود می‌دانم که از زحمات بی‌دریغ، و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای ریاحی در راستای انجام این پروژه در طول یک سال گذشته تشکر و قدردانی نمایم.

از همکاران و دوستانم در آزمایشگاه فیبر نوری، آقای عارف و خانم نوری که از راهنمایی‌های ارزنده‌شان استفاده کرده‌ام کمال قدردانی را دارم.

از خانواده‌ام به‌ویژه مادر عزیزم که در تمامی مراحل زندگی پشتیبانم بوده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم و طول عمر باعزت و سلامتی را برای ایشان از خداوند منان خواستارم.

از همسر عزیزم که در طول این مدت صبورانه همراهی‌ام کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و برای ایشان آرزوی سلامتی و موفقیت می‌کنم.

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: بخشی از فرآیندهای مهم در ساخت قطعات میکرونی. (۴)
- جدول ۲-۱: مقایسه مواد زداینده سیلیکون حجمی. (۱۷)
- جدول ۱-۲: مقادیر مربوط به مشخصات مکانیکی. (۲۱)
- جدول ۲-۲: مقایسه محلول‌های مختلف EDP. (۳۳)
- جدول ۱-۳: طول موج‌ها، منابع و نواحی مورد استفاده برای فوتولیتوگرافی. (۵۶)
- جدول ۲-۳: مقایسه بین فوتورزیست‌های مثبت و منفی. (۵۹)
- جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی ORMOCORE. (۶۰)
- جدول ۴-۳: پارامترهای لازم جهت بدست آوردن ضخامت‌های متفاوت. (۶۱)
- جدول ۵-۳: عناصر ناخالصی در قطعات سیلیکونی. این عناصر ناخالصی ناشی از مواد شیمیایی و فرآیندهای ساخت ICهای سیلیکونی اثرات مخربی روی عملکرد قطعه دارند. (۷۷)
- جدول ۶-۳: مشخصات سیلیکون‌های بکار رفته در انجام آزمایشات. (۸۳)

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: زیرمجموعه‌های میکروتکنولوژی. (۲)

شکل ۲-۱: تراشه سنسور در سمت راست و IC کنترل و پردازش اطلاعات در سمت چپ. (۴)

شکل ۳-۱: سطح مقطع و نمای بالایی زدایش همسانگرد (جبهه موج کروی) در دو مرحله از فرآیند ماسک به رنگ خاکستری است؛ بخش نقطه چین قسمتی از ماسک را که زیر آن زدوده شده است نشان می‌دهد. (۸)

شکل ۴-۱: زدایش از زیر در زدایش همسانگرد: خطوط پهن، باریک شده اما خطوط باریک کاملاً از زیر زدوده شده‌اند. (۸)

شکل ۵-۱: ساخت فوتونیک کریستال‌ها روی یک ویفر SOI: plasma etching محل حفره‌های آزاد شده را تعیین می‌کند و SiO_2 بصورت همسانگرد از زیر پوسته سیلیکونی زدوده شده است. (۱۰)

شکل ۶-۱: ساختارهای ناهمسانگرد زدوده شده با مایعات در ویفر $<100>$. دیواره‌های شیب‌دار صفحات کند زدوده شده (۱۱۱) و صفحات افقی (۱۰۰) هستند. اگر صفحات کند زدوده شوند (۱۱۱) به هم برسند، زدایش پایان می‌یابد. (۱۲)

شکل ۷-۱: ساختارهای زدوده شده ناهمسانگرد برای سیالات. (۱۳)

شکل ۸-۱: آرایه‌ای از میکروسوزن‌های سیلیکونی. (۱۴)

شکل ۹-۱: اشکال ناهمسانگرد زدوده شده با پلاسما: (a) عمودی ایده‌آل، (b) عمودی عملی با کمی زدایش از زیر ماسک و دیواره‌های شیب‌دار و (c) عکس SEM از مقطع عرضی RIE. (۱۵)

شکل ۱۰-۱: سیستم reactive ion etching با صفحات موازی. (۱۵)

شکل ۱۱-۱: مراحل ترتیبی ساخت ادوات میکرونی روی سطح. ابتدا Phosphosilicate glass (PSG) لایه نشانی شده و روی آن طرح زده شده است تا یک لایه واسط باشد. سپس لایه ساختاری polysilicon اضافه و طرح زده شده است. در نهایت لایه واسط PSG زدوده شده و از بین رفته و پل polysilicon آزاد شده است. (۱۸)

شکل ۱-۲: شبکه سیلیکون: یاخته واحد شامل ۸ اتم است. (۲۲)

شکل ۲-۲: بعضی از صفحات کریستالی مهم سیلیکون با اندیس‌های میلر آنها. (۲۲)

شکل ۲-۳: نمای اتمی و تصویر میکروسکوپ نوری (از بالا به پایین) از $\text{Si}\{100\}$ ، $\text{Si}\{110\}$ و $\text{Si}\{111\}$. (۲۴)

شکل ۲-۴: مراحل ساخت سیلیکون به روش Czochralski (cz). (۲۵)

شکل ۲-۵: ویفرهای سیلیکونی. (۲۶)

شکل ۲-۶: یک ویفر سیلیکون طوری بریده شده که یکی از صفحات (۱۰۰) سطح ویفر را مشخص می‌کند، بردار عمود به سطح در جهت $[100]$ و لبه صاف در راستای $[110]$ می‌باشد. (۲۶)

شکل ۲-۷: flat‌های ویفر برای تعیین جهت کریستالی و نوع عنصر کاشته شده در ویفر سیلیکون. (۲۷)

شکل ۲-۸: تعریف سوراخ‌ها و دندان‌ها. (۲۸)

شکل ۲-۹: تعریف گوشه‌های مقعر و محدب - ماسک زدوده نشده، تیره، کف زدوده شده، روشن و دیواره‌های شیب‌دار، خاکستری هستند. (۲۸)

شکل ۲-۱۰: هندسه طرح پره‌ای شکل. (۲۹)

شکل ۲-۱۱: شکل هندسی نوک پره. (۳۰)

شکل ۲-۱۲: طرح‌های پره‌ای شکل تجربی برای ویفر (۱۰۰) در EDP. (۳۲)

شکل ۲-۱۳: انواع ساختارهای قابل ساخت روی ویفر (۱۰۰). (۳۷)

شکل ۲-۱۴: مقایسه بین نمونه‌های زدوده شده در غلظت‌های مختلف. (۳۸)

شکل ۲-۱۵: دیاگرام Arrhenius برای نرخ زدایش ویفر $\langle 100 \rangle$ در محلول‌های KOH و EDP. (۳۹)

شکل ۲-۱۶: وابستگی دمایی نرخ‌های زدایش جهات کریستالی اصلی $\langle 100 \rangle$ ، $\langle 110 \rangle$ و $\langle 111 \rangle$ در محلول EDP نوع S. (۴۰)

شکل ۲-۱۷: دیاگرام Arrhenius برای نرخ‌های زدایش. (۴۱)

شکل ۲-۱۸: انرژی فعال‌سازی نرخ زدایش جانبی ویفر برای صفحات کریستالی مختلف در هنگام استفاده از محلول EDP نوع S. (۴۲)

شکل ۲-۱۹: نرخ زدایش سیلیکون $\{100\}$ به صورت تابعی از غلظت KOH در دمای 72°C . (۴۳)

شکل ۲-۲۰: نرخ‌های زدایش $\langle 100 \rangle$ و $\langle 110 \rangle$ در محلول $20\% \text{ KOH}$ با و بدون افزودن isopropyl alcohol. (۴۳)

- شکل ۳-۱: تصاویر SEM از آرایه‌ای از پایه‌های سیلیکونی تک کریستال. (۴۵)
- شکل ۳-۲: آرایه‌ای از منشورهای سیلیکونی V شکل با گام $200\mu m$ که با wet etching ناهمسانگرد ساخته شده است. (۴۶)
- شکل ۳-۳: موجبر خمیده در آرایه‌ای دو بعدی از میله‌ها. موجبر خمیده با حذف ردیفی از میله‌ها معین شده است. (۴۷)
- شکل ۳-۴: فوتونیک کریستال سه بعدی با ساختار لایه به لایه. هر لایه به صورت مجزا ساخته شده است. (۴۸)
- شکل ۳-۵: وابستگی نرخ زدایش سیلیکون (۱۰۰) به دما و غلظت ماده زداینده. (۵۰)
- شکل ۳-۶: نمایش کاهش زبری سطح با افزایش غلظت ماده زداینده در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد (الف): غلظت ۲۰٪ (ب) ۴۰٪. (۵۱)
- شکل ۳-۷: زدایش صفحات (۱۱۱) روی ویفر سیلیکون (۱۰۰). (۵۲)
- شکل ۳-۸: زدایش صفحات (۱۱۱) روی ویفر سیلیکون (۱۰۰). (۵۲)
- شکل ۳-۹: الف و ب: ایجاد لبه‌های کاملاً تیز توسط صفحات (۱۱۱) بر روی ویفر (۱۰۰) با نورپردازی و تغییر زاویه تابش نور. (۵۳)
- شکل ۳-۱۰: زدایش سطح ویفر سیلیکون (۱۱۰) و ایجاد هرم‌های چهار وجهی روی سطح. (۵۴)
- شکل ۳-۱۱: مشاهده صفحات کند زوده شونده (۱۱۱) روی ویفر سیلیکون (۱۱۰). تمام چهار وجهی‌ها در راستایی خاص منظم شده‌اند. (۵۴)
- شکل ۳-۱۲: نمای روبروی ساختار کریستالی ویفر سیلیکون (الف): (۱۰۰) و (ب): (۱۱۰). (۵۵)
- شکل ۳-۱۳: چیدمان سیستم فوتولیتوگرافی به روش EUV (Extreme Ultraviolet). (۵۶)
- شکل ۳-۱۴: فوتورزیست خطی. (۵۷)
- شکل ۳-۱۴: ب: فوتورزیست خطی. (۵۷)
- شکل ۳-۱۵: نمایش شماتیک نحوه عملکرد فوتورزیست‌های مثبت و منفی. (۵۸)
- شکل ۳-۱۶: نمودار درختی ORMOCERها. (۶۰)
- شکل ۳-۱۷: دیاگرام منحنی چرخشی برای یک نمونه ormocore خالص. (۶۲)

شکل ۳-۱۸: طرح شماتیک مراحل لایه نشانی پلیمر اپتیک. (۶۳)

شکل ۳-۱۹: نمایش شماتیک روش تماسی. (۶۳)

شکل ۳-۲۰: نمایش شماتیک روش نزدیکی. (۶۴)

شکل ۳-۲۱: نمایش شماتیک روش تصویر. (۶۵)

شکل ۳-۲۲: چیدمان سیستم فوتولیتوگرافی موجود در آزمایشگاه به روش نوشتن مستقیم توسط پرتو لیزر. (۶۶)

شکل ۳-۲۳: دستگاه لایه نشانی به روش تبخیری. (۶۸)

شکل ۳-۲۴: مراحل آماده سازی ماسک فلزی. (۶۹)

شکل ۳-۲۵: مراحل آماده سازی ماسک PMMA. (۷۰)

شکل ۳-۲۶: تصویر واقعی از اندازه فوکوس بدست آمده. (۷۱)

شکل ۳-۲۷: چیدمان سیستم فوتولیتوگرافی در آزمایشگاه. (۷۲)

شکل ۳-۲۸: مراحل طی شده جهت ایجاد طرح ماسک بر روی نمونه سیلیکونی به روش لیتوگرافی. (۷۳)

شکل ۳-۲۹: نمایش شماتیک جدا شدن ماسک از سطح توسط حباب هیدروژن ناشی از زدایش. (۸۳)

شکل ۳-۳۰: ماسک فوتورزیست با طرح توری دوبعدی $40 \times 25 \mu m$ روی سطح سیلیکون. (۸۴)

شکل ۳-۳۱: ماسک های مربعی روی سطح سیلیکون (۱۰۰). دیواره ها صفحات (۱۱۱) هستند. (۸۵)

شکل ۳-۳۲: لبه های زدوده شده همه در یک جهت نیستند. (۸۶)

شکل ۳-۳۳: عکس SEM از سطح سیلیکون (۱۰۰) زدوده شده در ۲۵٪ KOH پس از ۱۰ دقیقه. هرم های

هشت وجهی روی سطح مشاهده می شوند. (۸۷)

شکل ۳-۳۴: عکس SEM از هرم های هشت وجهی روی سطح. (۸۷)

شکل ۳-۳۵: نمای شماتیک (a): هرم چهار وجهی (b): هرم هشت وجهی. (۸۸)

شکل ۳-۳۶: عکس های SEM از زدایش سطح سیلیکون (۱۰۰) در $4M KOH$ در (a) ۱۲ دقیقه (b) ۲۰

دقیقه. (۸۹)

شکل ۳-۳۷: تصویر SEM از هرم های چهار و هشت وجهی ($0.33 g g^{-1} KOH / H_2O, 65^\circ C$). (۸۹)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

۱-۱	مقدمه‌ای بر ساخت ادوات میکرونی	۱
۲-۱	ساخت قطعات میکرونی در حجم	۵
۱-۲-۱	Wet etching	۷
۱-۱-۲-۱	Isotropic wet etching	۸
۲-۱-۲-۱	Anisotropic wet etching	۱۱
۲-۲-۱	Dry Etching	۱۴
۳-۱	Surface micromachining	۱۸

فصل دوم: ساخت ادوات میکرونی با استفاده از زدایش ناهمسانگرد در محلول‌های قلیایی

۱-۲	چرا سیلیکون؟	۲۰
۲-۲	ساختار کریستالی سیلیکون	۲۱
۳-۲	رشد کریستال و فرایند برش ویفر	۲۵
۴-۲	اثرات ساختار کریستالی سیلیکون بر روی شکل ساختار بدست آمده	۲۷
۱-۴-۲	طبقه‌بندی‌های شکل و گوشه‌ها	۲۷
۲-۴-۲	طرح‌های پره‌ای شکل	۲۸
۵-۲	زدایش ناهمسانگرد سیلیکون کریستالی در محلول‌های قلیایی	۳۲
۱-۵-۲	مطالعه ساختار سطوح زدوده شده سیلیکون	۳۷
۲-۵-۲	وابستگی دمایی نرخ‌های زدایش	۳۹
۳-۵-۲	اثرات ترکیبات و غلظت مواد زداینده	۴۲

فصل سوم: بررسی‌های تجربی و تحلیل نتایج

۱-۳	مقدمه	۴۴
۲-۳	اندازه‌گیری نرخ‌های زدایش و بررسی بستگی آنها به دما و غلظت ماده زداینده	۴۹

اولین مشاهدات زدایش سطح و بررسی نتایج.....	۵۱.....	۳-۳
فوتولیتوگرافی.....	۵۵.....	۴-۳
فوتورزیست‌ها.....	۵۷.....	۳-۴-۱
مشخصات فوتورزیست‌های مورد استفاده (ORMOCERها).....	۵۹.....	۳-۴-۲
لایه‌نشانی چرخشی.....	۶۱.....	۳-۴-۳
روش‌های فوتولیتوگرافی.....	۶۳.....	۳-۴-۴
روش تماسی.....	۶۳.....	۳-۴-۴-۱
روش نزدیکی.....	۶۴.....	۳-۴-۴-۲
روش تصویر.....	۶۴.....	۳-۴-۴-۳
روش نوشتن مستقیم توسط پرتو لیزر.....	۶۵.....	۳-۴-۴-۴
انواع ماسک.....	۶۷.....	۳-۵
ماسک فلزی.....	۶۷.....	۳-۵-۱
ماسک PMMA.....	۶۹.....	۳-۵-۲
ماسک فوتورزیست.....	۷۰.....	۳-۵-۳
تمیزکاری.....	۷۳.....	۳-۶
تمیزکاری و آماده‌سازی سطح ویفر سیلیکون.....	۷۳.....	۳-۶-۱
تکنولوژی تمیزکاری و آماده‌سازی سطح ویفر سیلیکون.....	۷۴.....	۳-۶-۲
انواع آلاینده‌ها و منشا آنها.....	۷۵.....	۳-۶-۳
اثرات آلاینده‌ها و نقایص روی وسایل سیلیکونی.....	۷۶.....	۳-۶-۴
مروری بر تکنولوژی تمیزکاری و آماده‌سازی سطح ویفر سیلیکون.....	۷۷.....	۳-۶-۵
فرآیندهای آبی و تکنولوژی خشک کردن ویفر.....	۷۷.....	۳-۶-۵-۱
فرآیند تمیزکاری RCA.....	۷۸.....	۳-۶-۵-۲
مراحل تمیزکاری تجربی.....	۸۰.....	۳-۷
زدایش با محلول قلیایی KOH.....	۸۱.....	۳-۸
نتایج تجربی.....	۸۳.....	۳-۹

۹۰..... ۳-۹-۱ دلایل تشکیل برجستگی‌های هرمی شکل روی سطح

۹۲..... نتیجه‌گیری

۹۳..... پیشنهادات

۹۴..... مراجع

۹۷..... چکیده به انگلیسی

چکیده

در این پایان نامه زدایش ناهمسانگرد ویفرهای سیلیکون (۱۰۰)، در محلول قلیایی KOH مورد بررسی قرار گرفته است. با اندازه‌گیری نرخ‌های زدایش ویفرهای سیلیکون (۱۰۰)، وابستگی این نرخ‌ها به غلظت و دمای ماده زداینده بررسی شده و نمودار نرخ زدایش سیلیکون (۱۰۰) بر حسب غلظت در دماهای مختلف رسم شده است. سه نوع ماسک مختلف جهت انتقال طرح بر روی سیلیکون مورد آزمایش قرار گرفتند که چسبندگی کم ماسک بر روی سیلیکون مشکل اصلی در تمامی این آزمایشات به شمار می‌رفت. با استفاده از روش تمیز کاری RCA و انجام آزمایشات مجدد با ماسک فوتورزیست، میزان چسبندگی این ماسک به سطح را افزایش داده و برای بررسی شکل زدایش از طرح‌های توری شکل دو بعدی با دوره‌های تناوب مختلف، که توسط فوتولیتوگرافی به روش انتقال طرح مستقیم توسط لیزر ساخته شده بودند، استفاده کرده‌ایم. در نهایت زدایش سطح توسط میکروسکوپ‌های اپتیکی انعکاسی و الکترونی (SEM) مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتیجه بررسی‌ها نشان داد که صفحات (۱۱۱) کمترین نرخ زدایش را دارند و بنابراین دیواره‌های ساختارهای ایجاد شده را تشکیل می‌دهند.

کلمات کلیدی:

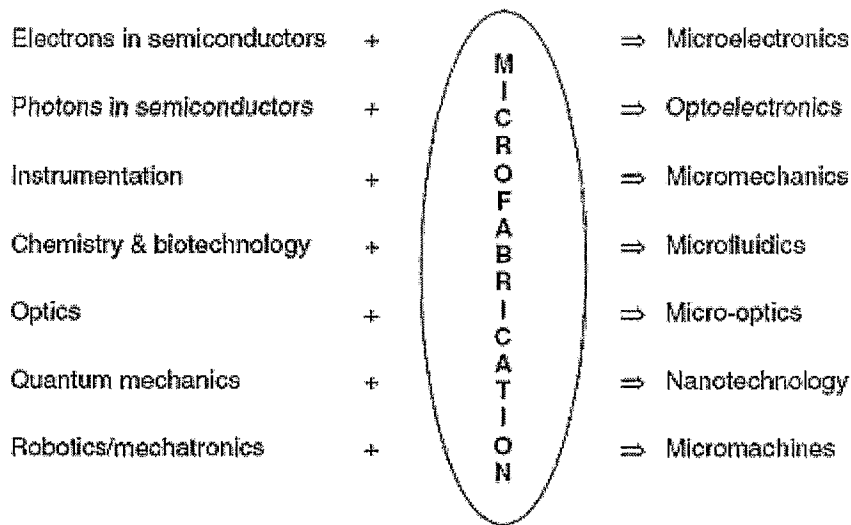
زدایش ناهمسانگرد سیلیکون، نرخ زدایش وابسته به دما و غلظت ماده زداینده، زدایش با محلول قلیایی KOH، ساخت ادوات میکرونی در حجمی از سیلیکون.

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه‌ای بر ساخت ادوات میکرونی

صنعت مدارهای مجتمع و صنایع وابسته مانند میکروسیستم‌ها / MEMS^۱، سلولهای خورشیدی، نمایشگرهای صفحه تخت و اپتوالکترونیک برپایه ساخت قطعات میکرونی می‌باشند. ابعاد نوعی در صفحه ویفر حدودا $1\mu m$ می‌باشند (این بازه نسبتا بزرگ است؛ از $0.1\mu m$ تا $100\mu m$). ابعاد عمودی از ضخامت یک لایه اتمی ($0.1nm$) تا صدها میکرومتر تغییر می‌کنند اما ضخامت‌های از $10nm$ تا $1\mu m$ نمونه‌های بارز هستند.

توسعه تاریخی نظام مرتبط با ساخت قطعات میکرونی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۱]. اختراع ترانزیستور در سال ۱۹۴۷ جرقه‌های یک انقلاب را زد. ترانزیستور از ترکیب تکنولوژی رادار (آشکارسازهای کریستالی سریع تابش الکترومغناطیسی) و فیزیک حالت جامد متولد شد. دستیابی به روش‌های ساخت قطعات میکرونی، توانایی ساخت بسیاری از ترانزیستورها روی یک قطعه نیمه‌رسانا، و چندین سال بعد ساخت مدارهای مجتمع را ممکن ساخت. یعنی ترانزیستورها به جای اینکه جدا از هم بوده و روی برد مدار دوباره به هم وصل شوند، روی یک ویفر به یکدیگر متصل بودند.



شکل ۱-۱: زیرمجموعه‌های میکروتکنولوژی [۱]

تجهیزات میکروالکترونیک و اپتوالکترونیک از ویژگی‌های نیمه‌رسانایی سیلیکون استفاده می‌کنند. کاشت عناصر در سیلیکون می‌تواند مقاومت آن را تا هشت مرتبه بزرگی تغییر داده، توانایی ساخت تعداد کثیری از قطعات و ساختارهای میکرونی را فراهم آورد. امروزه وسایل الکترونیکی میکرونی با پیچیدگی بسیار زیاد و کوچک‌سازی‌شان توصیف می‌شوند به طوری که صدها میلیون ترانزیستور روی یک تراشه به ابعاد یک ناخن گنجانده می‌شوند.

Gallium arsenide و دیگر نیمه‌رساناهای مرکب گروه‌های III تا V برای ساخت ابزار گسیل نور مانند لیزر بکار می‌روند. ادوات اپتوالکترونیکی سیلیکونی می‌توانند بعنوان آشکارسازهای نور بکار روند اما اخیراً عبور نور از سیلیکون در آزمایشگاه‌ها از طریق تجربی نشان داده است. میکرواپتیک، از سیلیکون به طریق دیگری استفاده می‌کند: سطوح سیلیکونی به عنوان آینه یا یک پایه به شدت صاف و هموار برای آینه‌های فلزی یا دی‌الکتریک عمل می‌کنند. سیلیکون می‌تواند برای ساخت آینه‌های قابل حرکت^۱ و المان‌های نوری قابل^۲ انطباق تراشیده شود. دی‌اکسید سیلیکون و نیتريد سیلیکون می‌توانند لایه‌نشانی و زدوده شوند تا موجبرهایی با ضرایب شکست پله‌ای و یا پلکانی مانند تارهای نوری ساخته شوند.

^۱ Movable mirrors

^۲ Adaptive optical elements

نانوتکنولوژی نتیجه و بسط ساخت ادوات میکرونی است. ابزارهایی مانند دستگاه‌های لیتوگرافی باریکه الکترونی، که سالها قبل از اختراع واژه نانوتکنولوژی، برای کشیدن ساختارهای با اندازه‌های نانومتری بکار می‌رفته‌اند به همین شکل هستند.

علم و تکنولوژی همواره به سمت کوچک‌سازی حرکت کرده‌اند. در اواخر دهه ۸۰، تک اتم‌ها توسط scanning tunneling microscope (STM) دستکاری شدند [۲]. STM یک پروب نوک تیز به ابعاد یک اتم دارد. زمانی که فاصله بین نوک پروب و یک نمونه تخت تقریباً ۱nm است و جریان تونل‌زنی تحت کنترل قرار گرفته و ثابت نگه داشته می‌شود، با بکار بردن یک پالس ولتاژ، استخراج یک تک اتم از سطح نمونه و قرار دادن آن در محلی دلخواه امکان‌پذیر می‌شود. پس از آن در نقاط مختلف دنیا آزمایشات بسیاری با آرایش دادن اتم‌ها برای نوشتن مقالات، انجام شدند [۳]. برای مشاهده شکل‌های مولکولی، دستکاری تک مولکول‌ها و تغییر دادن آنها نیز همین ابزار و لوازم مفید خواهند بود.

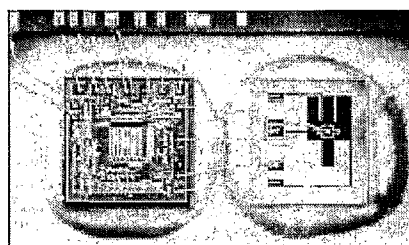
ساختارهای میکرونی به عنوان پلی برای برقراری ارتباط بین دنیای نانو و دنیای ماکروسکوپی ضروری هستند. روش‌های ساخت ادوات میکرونی^۱، که برای کاربردهای میکروالکترونیک مانند ساخت مدارهای مجتمع، بوجود آمده و بسط داده شده‌اند، می‌توانند برای ساخت میکروساختارهای سه بعدی بعنوان رابطی با دنیای نانو بکار روند. ساخت قطعات میکرونی^۲ کاربردهای صنعتی بسیاری مانند شتاب‌سنجهایی که کیسه هوای داخل اتومبیل‌ها را راه می‌اندازند [۴] (شکل ۱-۲) و نیز کاربردهای بسیاری در زمینه تحقیقات و توسعه دارد. بعنوان مثال، مولفه اصلی دستگاه AFM^۳ که نقش مهمی در تحقیقات علوم نانو دارد، یک میکرو ساختار معلق پل مانند^۴ با یک نوک تیز یکپارچه است.

microfabrication^۱

micromachining^۲

Atomic force microscope^۳

cantilever^۴



شکل ۱-۲: تراشه سنسور در سمت راست و IC کنترل و پردازش اطلاعات در سمت چپ

در ساخت ادوات میکرونی یک حجمی از ماده^۱ یا لایه‌های نازک توسط لیتوگرافی و زدایش^۲ یا بسیاری از ابزار برش دقیق دیگر، به شکل میکروساختارها درمی‌آیند. در این کار اغلب از سیلیکون بعنوان زیرلایه استفاده می‌شود. جدول ۱-۱ برخی از فرآیندهای رایج استفاده شده در ساخت این ادوات را نشان می‌دهد.

لازم است پیش از پرداختن به روش خاص انتخاب شده برای کار به بررسی روش‌های مختلف ساخت میکروساختارها و تا حدی موارد کاربرد و استفاده از آنها بپردازیم.

جدول ۱-۱: بخشی از فرآیندهای مهم در ساخت قطعات میکرونی [۸]

Subtractive Technique	Applications	Typical Etch Rate	Remark
Wet Chemical etching	cantilevers bridges, grooves	from $1\mu\text{m}/\text{min}$ to $50\mu\text{m}/\text{min}$	simple but poor control
Electrochemical etching	Etch stop technique	p-Si etching at $1.25-1.75\mu\text{m}/\text{min}$	complex, require electrode
Dry chemical etching	Resist stripping Isotropic features	Typical Si etch rate $0.1\mu\text{m}/\text{min}$	Resolution better than $0.1\mu\text{m}$
Phys./Chem. etching	Very precise pattern transfer	Typical Si etch rate $0.1 - 1\mu\text{m}/\text{min}$	Most important of dry etching
Focused ion-beam milling	microstructures in arbitrary materials	Typical Si etch rate $1\mu\text{m}/\text{min}$	Long fabrication time

Bulk material^۱

etching^۲

۲-۱ ساخت قطعات میکرونی در حجم^۱

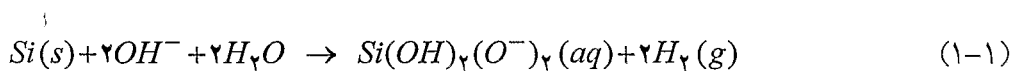
در مراحل قدیمی ساخت ادوات میکرونی، بسیاری از انواع محلول‌های شیمیایی، شامل اسید و باز، مقادیر مشخصی از سیلیکون را بصورت انتخابی از یک ویفر سیلیکون جدا می‌کردند. در این مورد، ساختارهای میکرونی می‌توانستند توسط واکنش شیمیایی سیلیکون با ماده زداینده تشکیل شوند. علی‌رغم اینکه اخیراً ضرورت بیشتری برای دسترسی به ادوات میکرونی سطحی با دقت بالاتر احساس می‌شود، میکروساختارهای حجمی همچنان بطور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. بالاخص در پرتو روش‌های جدید زدایش خشک^۲ مانند زدایش با پلاسما و reactive ion etching ساخت ابعاد میکرونی در حجم می‌تواند در ترکیب با فرآیندهای بسیار دیگری بکار رود. بنابراین بعید به نظر می‌رسد که ساخت ادوات میکرونی در حجم در آینده‌ای نزدیک اهمیت خود را از دست بدهد.

روش‌های زدایش بر حسب حالت ماده زداینده به دو دسته تقسیم می‌شوند: wet و dry

واکنش‌های اصلی در زدایش به شرح زیر هستند:

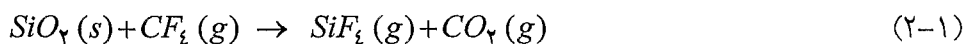
Wet etching:

مواد حل شدنی → مایع زداینده + جامد



Plasma etching:

محصولات فرار → گاز زداینده + جامد



برای پیش رفتن زدایش سه فرآیند باید اتفاق بیفتد:

- رساندن ماده زداینده به سطح
- واکنش سطح

^۱ Bulk micromachining

^۲ Dry etching

• خارج کردن انواع محصولات^۱

اگر زدایش اتفاق نیفتد هر کدام از این سه فرآیند می‌توانند مسبب این مشکل باشند: مثلاً یک لایه ضخیم در مرز می‌تواند از انتقال ماده زداینده جلوگیری کرده یا میزان انتقال را کاهش دهد. یک اکسید طبیعی^۲ یا پسماندهای مراحل قبلی می‌توانند مانع زدایش شده یا آنرا به تعویق اندازند و یا اینکه محصولات واکنش به میزان کافی فرار و یا حل شدنی نباشند و دوباره روی ویفر بنشینند. حباب‌های گاز ایجاد شده طبق معادله (۱-۱) می‌توانند سطح را از زدایش‌های بعدی حفظ کنند.

نرخ‌های زدایش در هر دو نوع فرآیند زدایش wet و plasm حدوداً ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ nm/min هستند. زدایش سیلیکون استثنایی است: نرخ‌های زدایش بیش از ۲۰ μm/min در هر دو مورد (HF : HNO₃) wet etching و plasma etching (DRIE) در SF₆/C₄F₈ قابل دستیابی هستند.

موادی وجود دارند که با مواد زداینده مایع زدوده نمی‌شوند مانند SiC, GaN, TiC, و الماس. اما این مواد با پلاسما زدوده می‌شوند. بعضی مواد حتی با پلاسما هم زدوده نمی‌شوند چون هیچ ترکیب مناسبی از گاز و محصول فرار برای آنها وجود ندارد. در این مورد یک زدایش کاملاً فیزیکی به نام ion milling یا ion beam etching (IBE) می‌تواند استفاده شود. بمباران یون آرگون باعث زدایش هر ماده‌ای خواهد شد. بسیاری از garnet های لیزرهای حالت جامد و مواد مغناطیسی (از نوع Gd₃Ga₅O₁₂ و گادولینیوم گالیوم) gadolinium gallium garnet) توسط ion milling زدوده می‌شوند. اما پیدا کردن مواد مناسب بعنوان ماسک که زدوده نشوند مشکل است. زمانی که هر ماده‌ای توسط بمباران آرگون زدوده می‌شود، مواد ماسک هم همین شرایط را خواهند داشت. نرخ‌های زدایش با ion milling نوعی ۱۰-۱۰۰ nm/min بوده و یک مرتبه بزرگی کوچکتر از plasma etching می‌باشند.

واژه dry etching که در مقابل wet etching است معمولاً به عنوان مترادف plasma etching بکار

می‌رود، اما روش‌های dry یی وجود دارند که پلاسما را در بر نمی‌گیرند، مثلاً زدایش با گاز XeF₄.

^۱ Removal of product species

^۲ Native oxide