

به نام خداوند بخشنده مهربان



دانشکده مکانیک

گرایش تبدیل انرژی
پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی جریان دوفازی در میکروکانال

دانشجو:

سید یاشار قرشی

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسن کیهانی

دکتر محمد محسن شاهمردان

استاد مشاور:

دکتر علی عباس نژاد

پایان نامه جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

شهریور ۹۴

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم؛ به شکرانه‌ی گرمای وجودشان

و به پاس زحمات بی دریغشان

تشکر و قدردانی

نخست، حمد و سپاس خدای را که به من سعادت گذر از مرحله‌ای دیگر از دوران آموختن و توفیق کسب دانش و معرفت عطا فرمود. پروردگارا؛ آنچه داده‌ای بیش از شایستگی من است گرچه در خور بخشندگی توست؛

تشکر و سپاس از پدر و مادر عزیزم که هر چه هستم از آن‌هاست؛ بردستان مهر با نشان بوسه زده و قدردان حضور و حمایت خانواده‌ام در تمامی مراحل زندگانی‌ام هستم.

از اساتید گران قدرم، جناب آقای دکتر کیهانی، جناب آقای دکتر شاه مردان، جناب آقای دکتر عباس نژاد به پاس راهنمایی‌ها، حمایت‌ها و محبت‌های بی‌دریغشان کمال تشکر را دارم، بی‌شک بدون حضور و حمایت ایشان گذر از این راه ممکن نبود.

از تمامی دوستانم خصوصاً جناب آقای دکتر قزلو و همسر گرامی‌شان، اعضای شرکت نانوشات و مدیریت آن مجموعه جناب دکتر هراتی زاده و کارشناسان آزمایشگاه میکروالکترونیک دانشگاه صنعتی شریف جناب آقای مهندس مساحتی و سرکار خانم مهندس مهدوی که در این مدت هر یک به نوعی من را همراهی کرده و همچون خواهران و برادرانم، دست مهر بانی و یاری را از من دریغ نکردند سپاسگزارم و از خداوند متعال خوشبختی و موفقیت را در تمامی مراحل زندگی برایشان خواستارم. در پایان، از همه عزیزانی که به نحوی در انجام و پیشرفت این تحقیق نقش بسزایی داشته و ذکر نام آن‌ها در اینجا مقدور نبوده، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

امروزه دفع حرارت و کنترل دما در سامانه‌هایی با تولید شار حرارتی بالا در صنایعی همچون الکترونیک، هوافضا، نظامی، خودرو، سلول‌های خورشیدی، سلول‌های سوختی و غیره دارای اهمیت بالایی است. در بیشتر مواقع بهینه‌سازی سامانه‌های انتقال گرما به وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت می‌گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه‌ی این دستگاه‌ها می‌شود. در مبدل‌های حرارتی دو پدیده مهم اتفاق می‌افتد. ابتدا سیال درون کانال جاری شده و بین سیال و دیواره انتقال حرارت صورت می‌گیرد. بنابراین برای بهبود این دو پدیده اولاً از آنجاکه نرخ انتقال حرارت به نسبت مساحت سطح به حجم بستگی دارد پس کانال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر ضریب انتقال حرارتی بهتری را ایجاد می‌کنند. همچنین استفاده از سیالاتی با خواص بهبود یافته می‌تواند باعث افزایش کارایی مبدل شود. بنابراین یکی از راه‌های مؤثر برای دفع این حرارت تولیدشده استفاده از میکروکانال‌ها است.

در پژوهش حاضر ما به انتقال حرارت در میکروکانال‌ها که در اثر جابجایی آب دی‌یونیزه اتفاق می‌افتد، پرداختیم. این چاه حرارتی میکروکانال دارای ۸۰ کانال موازی با سطح مقطع مستطیلی شکل به عرض $100\ \mu m$ ، ارتفاع $100\ \mu m$ و طول $20\ mm$ است. جنس این کانال‌ها از سیلیکون با جهت‌گیری <۱۱۰> که به روش کنده‌کاری تراشیده شده است. در این پژوهش تنها به بررسی ضریب انتقال حرارتی در شار حرارتی ثابت $(41/378\ \frac{kW}{m^2})$ و سه دبی متفاوت انجام شد.

کلمات کلیدی: میکروکانال، انتقال حرارت، سیلیکون، ضریب انتقال حرارت، جریان دوفازی

فهرست مطالب

عنوان.....	صفحه.....
فصل اول: مقدمه	
۱-۱ پیشنهاد تحقیق.....	۲
فصل دوم:	
۱-۲ مقدمه.....	۲۲
۲-۲ تقریبهای جریان جوشش.....	۲۲
۳-۲ بیانات کلی در مورد جریان جوشش در میکروکانالها.....	۲۷
۴-۲ تقریبهای انتقال حرارت جوشش در کانالهای کوچک.....	۳۰
۵-۲ تقریب لیو و ونیترتون.....	۳۲
۶-۲ تقریب کاندلیکار.....	۳۳
۷-۲ تقریب چن.....	۳۴
۸-۲ تقریب شاه.....	۳۶
۹-۲ تقریب گانگورو و ونیترتون.....	۳۶
۱۰-۲ تقریب بجنورگ و همکاران.....	۳۶
۱۱-۲ تقریب کلیمنکو.....	۳۸
۱۲-۲ تقریب اسیتنر و تابورک.....	۳۸
۱۳-۲ تقریب تران و همکاران.....	۳۹
۱۴-۲ تقریب لی و موداوار.....	۳۹
۱۵-۲ تقریب هاینز و فلچر.....	۴۰

فصل سوم:

- ۳-۱ مقدمه..... ۴۲
- ۳-۲ طبقه‌بندی میکروکانالها..... ۴۳
- ۳-۳ مزایا و چالشهای میکروکانالها..... ۴۴
- ۳-۴ روشهای ساخت میکروکانالها..... ۴۴
- ۳-۴-۱ روشهای سنتی..... ۴۶
- ۳-۴-۲ روشهای مدرن..... ۴۷
- ۳-۵ الگودهی - لیتوگرافی نوری..... ۵۰
- ۳-۵-۱ نگاهی اجمالی به لیتوگرافی نوری..... ۵۱
- ۳-۵-۲ ماسکهای نوری..... ۵۴
- ۳-۵-۳ ماده مقاوم به نور..... ۵۵
- ۳-۶ روشهای افزودن..... ۵۶
- ۳-۶-۱ رسوب دهی بخار شیمیایی..... ۵۶
- ۳-۶-۲ کسیداسیون حرارتی..... ۵۷
- ۳-۶-۳ رسوب دهی بخار فیزیکی..... ۵۷
- ۳-۶-۴ لایه نشانی سل - ژل..... ۵۸
- ۳-۶-۵ پوشش دهی چرخشی..... ۵۸
- ۳-۶-۶ ناخالص سازی..... ۵۹
- ۳-۷ روشهای کاهنده..... ۵۹
- ۳-۷-۱ کننده کاری تر..... ۵۹
- ۳-۷-۲ کننده کاری خشک..... ۶۲

فصل چهارم:

- ۶۴..... ۱-۴ نمای کلی
- ۶۶..... ۲-۴ روند ساخت میکروکانال
- ۶۷..... ۱-۲-۴ سیلیکون
- ۷۰..... ۲-۲-۴ کنده کاری تر ناهمسانگرد
- ۷۲..... ۳-۲-۴ نرخ کنده کاری
- ۸۰..... ۳-۴ داده برداری
- ۸۵..... ۴-۴ نتایج
- ۸۸..... ۵-۴ پیشنهادها

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: پیشینه‌ی دمای پردازنده مرکزی شرکت Intel..... ۳
- شکل ۲-۱: پیشینه‌ی دمای پردازنده مرکزی شرکت AMD..... ۳
- شکل ۱-۳: میکرو دگرسی..... ۴۶
- شکل ۲-۳: میکرواره کاری..... ۴۷
- شکل ۳-۳: روش کنده کاری عمیق یونی. ۱- نشاندن ماده مقاوم به نور ۲- اعمال نور ماورا بنفش ۳- تشکیل کانالها با در عرض قرار دادن بمباران یونی ۴ پوشاندن قسمت بالای کانالها..... ۴۹
- شکل ۴-۳: نمایی از الگودهی به روش لیتوگرافی نوری..... ۵۲
- شکل ۵-۳: مقایسه بین دو محلول نقش افکن که به خوبی (سمت راست) و به صورت نامناسب (سمت چپ) مخلوط شده است..... ۶۱
- شکل ۶-۳: تفاوت بین کنده کاری همسانگرد و ناهمسانگرد..... ۶۲
- شکل ۱-۴: جهت گیری سیلیکون تک کریستال..... ۶۹
- شکل ۲-۴: قرص سیلیکونی..... ۷۳
- شکل ۳-۴: الگوی اولیه ماسک شکل..... ۷۴
- شکل ۴-۴: میکروکانال کنده کاری شده بر روی قرص سیلیکونی..... ۷۴
- شکل ۵-۴: تصویر میکروسکوپ نوری از میکروکانالها (نواحی تاریک عمق میکروکانال را نشان می دهد)..... ۷۵
- شکل ۶-۴: طرح نهایی میکروکانال استفاده شده برای اندازه گیری دمای سطح خارجی Pt – 100..... ۷۶
- شکل ۷-۴: حس گر دمای میکروکانال..... ۷۷
- شکل ۸-۴: اکتساب داده و مبدل آن..... ۷۸
- شکل ۹-۴: نمونه المنت فشنگی استفاده شده برای آزمایش..... ۷۹

- شکل ۴-۱۰: میکرو پمپ و شیر سوزنی استفاده شده در آزمایش..... ۸۰
- شکل ۴-۱۱: تصویر کلی دستگاه آزمایش..... ۸۱
- شکل ۴-۱۲: میکروکانال شکسته شده در اثر حرارت بالا..... ۸۵
- شکل ۴-۱۳: تغییرات ضریب انتقال حرارت با تغییر دبی..... ۸۶
- شکل ۴-۱۴: تغییرات دمای دیواره در بازه زمان برای دبی $2/3$ میلی لیتر..... ۸۷
- شکل ۴-۱۵: تغییرات دمای دیواره در بازه زمان برای دبی $0/9$ میلی لیتر..... ۸۷
- شکل ۴-۱۶: تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز..... ۸۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: خلاصه‌ای از تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر روی جریان دوفازی..... ۷
- جدول ۲-۱: اجزای معادله ۱-۱..... ۹
- جدول ۳-۱: مزایا و معایب نانوسیالات..... ۱۱
- جدول ۴-۱: مطالعات بر روی میکروکانال‌های خنک‌کن تک فاز..... ۱۲
- جدول ۵-۱: مطالعات اخیر بر روی خنک‌کن‌های میکروکانال با جریان دوفاز..... ۱۳
- جدول ۶-۱: مقایسه چهار فناوری..... ۱۴
- جدول ۱-۲: مقادیر پیشنهادی برای پارامتر Ffl ۲۶
- جدول ۲-۲: تحلیل‌های مناسب برای میکروکانال‌ها..... ۳۰
- جدول ۱-۳: مقایسه ماده مقاوم مثبت و منفی..... ۵۵
- جدول ۲-۳: برخی نقش افکن‌های متداول..... ۶۱
- جدول ۱-۴: خواص مکانیکی سیلیکون..... ۶۷
- جدول ۲-۴: خواص حرارتی سیلیکون..... ۶۸
- جدول ۳-۴: مشخصات نقش افکن‌های مختلف در کنده‌کاری تر
ناهمسانگرد..... ۷۱
- جدول ۴-۴: مشخصات میکروکانال..... ۸۴
- جدول ۵-۴: دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه‌گیری..... ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشینه تحقیق

با پیشرفت فناوری، جهان به سمت کوچک‌سازی پیش می‌رود و این امر مستلزم حذف شار حرارتی تولیدشده است. با این کوچک‌سازی و توسعه‌ی سامانه‌ها به سمت ساخت میکرو نانو ادوات در کاربردهایی مثل ادوات پزشکی، سامانه میکرو الکترومکانیکی، حذف شار حرارتی باهدف حصول اطمینان از افزایش قابلیت اطمینان و ثبات عملکرد این دستگاه‌ها، حائز اهمیت است [۱].

این حرارت تولیدشده برای یک راکتور هسته‌ای تا حدود ۱۰۴ وات بر سانتی‌متر مربع است. میکروکانال‌ها با توجه به این که سطح انتقال حرارتی بزرگی بر واحد حجم جریان سیال فراهم می‌کنند، به‌طور طبیعی و قابل قبولی، ابزاری مناسب برای حذف شار حرارتی هستند [۲].

دستگاه‌هایی که نیازمند چنین ابزاری برای حذف شار حرارتی هستند به‌طور چشم‌گیری متنوع هستند، برای مثال برای بسته‌های متراکم مدار مجتمع [۳,۴] و لیزرها [۵] دارای پیشینه‌ی شار حرارتی گزارش‌شده‌ای در حدود ۱۰۲ وات بر سانتی‌متر مربع، تجهیزات الکترونیکی به‌کاررفته در صنایع هوانوردی و صنایع مجتمع سازی در مقیاس بزرگ تا حدود ۱۰۳ وات بر سانتی‌متر مربع [۶] و هم‌چنین در صنایع دفاعی و راکتورهای هم‌جوشی ادواتی حضور دارند که شار حرارتی در حدود ۱۰۴ وات بر سانتی‌متر مربع تولید می‌کنند [۷,۸].

التزام به حذف حرارت با پیشرفته‌تر شدن فناوری و کاهش سایز در کاربردهای فوق، رو به افزایش خواهد بود. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که به نظر می‌رسد محتمل‌ترین راه‌حل برای مشکلات ناشی از حرارت و خنک‌کاری تجهیزات در قرن حاضر استفاده از چاه‌های حرارتی میکروکانال^۱ خواهد بود.

یکی از پرکاربردترین تجهیزات که نیاز ضروری به حذف شار حرارتی تولید شده دارد، پردازنده

^۱ Microchannel Heat Sink

برای اولین بار آقای تاکرمن^۱ و پیس^۲ [۱۱] در سال ۱۹۸۱ میلادی در تحقیقی به مطالعه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی h بین زیر لایه و خنک‌کننده به‌عنوان اولین مانع برای رسیدن به مقاومت حرارتی پایین پرداختند. آن‌ها دریافتند که برای جریان آرام مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با پهنای کانال رابطه‌ی عکس دارد. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که نسبت منظر بالای^۳ کانال‌ها برای افزایش مساحت سطح کانال‌ها و در نتیجه‌ی آن کاهش مقاومت حرارت و افزایش انتقال حرارت در این نوع کانال‌ها بسیار مناسب است. با توجه به این نتایج آن‌ها اقدام به معرفی، ساخت و آزمایش چاه حرارتی سیلیکونی برای مدارهای مجتمع کردند. آن‌ها برای چگالی توانی به‌اندازه‌ی ۷۹۰ وات بر سانتی‌متر مربع یک بیشینه‌ی دمایی ۷۱ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای آب ورودی را اندازه‌گیری کردند که با تئوری آن‌ها تطابق خوبی داشت. آن‌ها میکروکانال‌هایی با طول ۵۰ میکرومتر و عرض ۵۰ میکرومتر را به روش کنده‌کاری شیمیایی^۴ با استفاده از هیدروکسید پتاسیم^۵ (کنده‌کاری وابسته به جهت) [۱۲]، تا عمق ۳۰۰ میکرون بر روی قرص سیلیکونی با جهت‌گیری <۱۱۰> که دارای ضخامت ۴۰۰ میکرون بود، ایجاد کردند. آن‌ها یک صفحه از جنس نسوز^۶ را به روش اتصال آندی^۷ [۱۳] بر روی کانال‌ها و هر دو چند راهه‌های ورودی و خروجی قرار دادند. هم‌چنین آن‌ها از آب مقطر به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند. دو حفره نیز به‌عنوان ورودی و خروجی سیال بر روی صفحه نسوز تعبیه کردند. حرارت موردنیاز توسط یک لایه‌ی نازک مقاومتی از جنس تنگستن سیلیسیوم^۸ با مساحت تقریباً ۱ × ۱ سانتی‌متر مربع و ضخامت یک میکرون که بر روی سطح جلویی قرص سیلیکونی به روش

^۱ D. B. Tuckerman

^۲ R. F. W. Pease

^۳ High-aspect Ratio

^۴ Wet Etch

^۵ KOH

^۶ Pyrex

^۷ Anody Bonding

^۸ WSi₂

اکسیداسیون حرارتی^۱ پوشانده شده بود، تغذیه می‌شد.

در سال ۱۹۸۷ فیلیپز^۲ [۱۴] پایان‌نامه‌ی خود را در موسسه فناوری ماساچوست^۳ با عنوان "جابه‌جایی اجباری، خنک‌کاری با مایعات و چاه‌های حرارتی میکروکانال" انجام داد. او به‌عنوان اولین نفری بود که پیشگام در توسعه‌ی تحقیق آقای تاکرمن و پیس شد. فیلیپز به تشریح یک روش برای محاسبه‌ی مقاومت حرارتی این چنین مبدل‌های حرارتی پرداخت. در روش او مقاومت حرارتی تابعی از لیست جامعی از متغیرهای مربوط بود. شگفت‌انگیزترین اثر تحقیقات وی در راستای تحقیقات بر روی جریان‌های توسعه‌یافته و جریان‌های آشفته بود. هم‌چنین وی برنامه‌ای کامپیوتری طراحی کرد به نام میکروهگز^۴ که قادر بود محاسباتی کسل‌کننده شامل معادلات سیالات و انتقال حرارت به‌منظور به دست آوردن ضریب انتقال حرارت به‌عنوان تابعی از تعدادی خواص فیزیکی و حرارتی مربوط به چاه حرارتی، انجام دهد. نتایج آزمایشگاهی وی که رفتار حرارتی پیش‌بینی‌شده را تأیید می‌کرد، برای نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته‌شده از ایندیم فسفید^۵ ارائه شد. در سال ۱۹۸۸ جیمز والپول^۶ و همکارانش [۱۵] استفاده از میکروکانال‌ها به‌عنوان چاه حرارتی را به‌عنوان یک روش مؤثر خارج کردن حرارت برای سطح تابشی دوبعدی مربوط به آرایشی از لیزرها را بروز دادند. چاه‌های حرارتی به‌صورت جداگانه ساخته شدند و سپس به‌وسیله لحیم‌کاری به پشت آرایه‌های دیود متصل شدند. در سال ۱۹۹۳ باورز^۷ و موداوار^۸ [۱۶] در آزمایشگاه جوشش و جریان دوفازی در دانشگاه پوردو^۹ با توجه به نیاز عملی به فناوری‌های خنک‌کاری که می‌توانند شارهای حرارتی بالا را حذف کنند، یک آزمایش مطالعاتی بر

^۱ Thermally-Oxidized

^۲ Richard J. Phillips

^۳ MIT

^۴ MicroHEX

^۵ InP

^۶ James walpole

^۷ M. B. Bowers

^۸ I. Mudawar

^۹ Purdu University

روی افت فشار و شار حرارتی بحرانی^۱ در مینی کانال‌ها و میکروکانال‌ها انجام دادند. آن‌ها از گاز R-133 به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند. برای رسیدن به شار حرارتی بحرانی آن‌ها از سیال عامل در حالت جوشش مادون سرد در ورودی استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه با تغییر دبی جریان ورودی و همچنین تغییر دمای سیال عامل در ورودی نتایج موردنظر را ارائه کردند. از نتایج مطالعه آن‌ها می‌توان به ارائه مدلی برای افت فشار و تقریبی برای شار حرارتی بحرانی اشاره کرد. این دو هم‌چنین در سال ۱۹۹۴ [۱۷] میکروکانال‌ها و مینی کانال‌ها را ابزاری برای حذف شار حرارتی تراشه‌های الکترونیکی معرفی کردند. در سال ۱۹۹۸ پرت^۲ [۱۸] در آزمایشگاه الکترونیک گرنوبل^۳ در فرانسه به مطالعه‌ی استفاده میکروکانال‌ها در زیر لایه‌های سیلیکونی به‌عنوان وسیله‌ی خنک‌کاری با مایع برای مدارهای مجتمع پرداخت. او و همکارانش توسط نرم‌افزار پاسکوسما^۴ و فلاکس 3D^۵ به محاسبه شار حرارتی دفع شده توسط میکروکانال‌ها با اشکال مختلف پرداختند و درنهایت با موفقیت یک کاربرد جدید از چاه‌های حرارتی میکروکانال که با فناوری میکروالکترونیک سیلیکونی به‌طور کامل سازگاری دارد را توصیف کردند.

در سال ۱۹۹۹ مصطفی غیاثیان و همکارانش [۱۹] در موسسه فناوری جورجیا^۶ مشغول به مطالعه بر روی جریان دوفازی گاز مایع در میکروکانال‌ها پرداختند. آن‌ها موفق به مشاهده‌ی الگوی جریان در میکروکانال‌ها شدند. در سال ۱۹۹۹ لینان ژیانگ^۷ [۲۰] یک فن منحصربه‌فرد که دارای کنده‌کاری سیلیکون بدون ماسک و خود جهت‌گیری^۸ بین قرص‌های متصل شده را توسعه دادند و آن

^۱ Critical Heat Flux (CHF)

^۲ C. Perret

^۳ Grenoble

^۴ Pascosma

^۵ Flux 3D

^۶ Georgia Institute of Technology

^۷ Lian Jiang

^۸ Self-Aligned

را برای ساخت چاه حرارتی میکروکانال یکپارچه با یک گرم‌کن و چیدمانی از حس‌گرهای^۱ دما اعمال کردند. این روش این اجازه را به فرآیند‌کننده‌کاری می‌دهد که به‌صورت خود جهت‌گیری و خود متوقف عمل کند. در سال ۲۰۰۰ شاه^۲ و همکاران [۲۱] تحقیقی پیرامون جریان سیال و انتقال حرارت در مقیاس میکرو و مزو با کاربرد طراحی مبدل حرارتی انجام دادند. در جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از مطالعات بر روی جریان دوفازی که حاصل تحقیقات شاه و همکاران بود را مشاهده می‌کنید.

جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی جریان دوفازی [۲۱]

منبع	هندسه کانال	قطر هیدرولیکی	سیال عامل	تقریب به‌دست‌آمده	
باورز و موداوار [۱۷] (۱۹۹۴)	دایره	۲۵۴۰ و ۵۱۰	R - 113	$\frac{q_{m,p}}{Gh_{fg}} = 0.16 We^{-0.19} \left(\frac{L}{D}\right)^{-0.54}$	
تانگ ^۳ و همکاران [۲۲] (۱۹۹۶)	دایره	۱۰۵۰	آب مقطر	تک فاز	$\frac{f}{f_a} = \left(\frac{\bar{\mu}_w}{\bar{\mu}_f}\right)^{0.163}$
				جوشش مادون سرد	$\frac{\Delta P_{sb}}{\Delta P_a} = \left(\frac{L_{sb}}{L_{sat}}\right)^{1.3} \exp\left[\left(\frac{L_{sb}}{L_{sat}}\right) + c\right]$
یانگ ^۴ و وب [۲۳] (۱۹۹۶)	مستطیلی	۲۶۳۷	R - 12	$\frac{f}{f_l} = 0.435 Re_{eq}^{0.12}$	

^۱ Sensor

^۲ RK Shah

^۳ Tong W

^۴ Yang C

در سال ۲۰۰۲ کاندلیکار^۱ از محققین موسسه فناوری راکستر^۲ [۲۴] مقاله‌ای با عنوان اصول مرتبط با جریان جوشش در کانال‌های با ابعاد مینی و میکرو به چاپ رسانید. این مقاله که یک مقاله‌ی مروری بر مطالعات گذشته بر روی تأثیر اندازه‌ی کانال بر الگوی جریان و انتقال حرارت و عملکرد افت فشار است، تلاش دارد تا پاسخی برای سؤالات اساسی مرتبط با حضور جوشش هسته‌ای و مشخصه‌های جریان جوشش در میکروکانال‌ها و مینی کانال‌ها در مقایسه با کانال‌های معمولی ارائه دهد. همچنین تأثیر هندسه‌ی مبدل حرارتی بر انتقال حرارت و عملکرد افت فشار بررسی شده است. در همین سال موداوار [۲۵] به بررسی آزمایشگاهی و عددی افت فشار و انتقال حرارت برای جریان تک فاز در چاه حرارتی میکروکانال پرداخت. در سال ۲۰۰۲ کاواهارا^۳ [۲۶] در یک مشاهده آزمایشگاهی در یک میکرو لوله به قطر ۱۰۰ میکرون مشخصه‌های جریان دوفازی را به دست آمده آورد. در همین سال کاندلیکار [۲۷] خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی الگوی جریان دوفازی، افت فشار و انتقال حرارت جوشش در تبخیرکننده‌های مینی کانال را ارائه داد.

در سال ۲۰۰۳ موداوار [۲۸] مقاله‌ای در مورد جریان جوشش در چاه حرارتی میکروکانال انجام داد. او در این آزمایش به مشاهده و ارزیابی روش‌های تقریبی پرداخته است. ۲۱ میکروکانال با سطح مقطع 231×713 میکرون را درست کرد. از آب مقطر به عنوان سیال عامل استفاده نمود. سرعت جرمی سیال ۱۳۵ الی ۴۰۲ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه بود. وی آزمایش‌های خود را در دو دمای ورودی ۳۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام داد. او نتیجه گرفت که ضریب انتقال حرارت جوشش در چاه حرارتی میکروکانال آب‌خنک به شدت تابع سرعت جرمی است و وابستگی ضعیفی به شار حرارتی دارد. همچنین با توجه به تحقیقات قبلی وی، آن‌ها مشاهده کردند که مکانیزم غالب برای چاه‌های حرارتی میکروکانال جوشش همرفتی اجباری است و نه جوشش هسته‌ای. از دیگر نتایج تحقیق وی می‌توان به

^۱ Satish G. Kandlikar

^۲ Rochester Institute of Technology

^۳ A. Kawahara

کاهش ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت تعادل ترمودینامیکی اشاره کرد. وی همچنین به مقایسه‌ای بین شش تقریب از انتقال حرارت برای کانال‌های معمولی و پنج تقریب برای میکروکانال‌ها پرداخت. در تحقیق دیگری [۲۷] وی به همراه کو^۱ به اندازه‌گیری و پیش‌بینی افت فشار دوفازی در چاه‌های حرارتی میکروکانال پرداختند. در این تحقیق وی یک رابطه برای پیش‌بینی افت فشار ارائه داد که این رابطه به صورت:

$$\Delta P_{pred} = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} + \Delta P_{sp,d} + \Delta P_{sp,f} + \Delta P_{tp} + \Delta P_{e2} + \Delta P_{e1} \quad (1-1)$$

که عبارات تشکیل‌دهنده‌ی این رابطه در جدول ۱-۲ آورده شده‌اند.

جدول ۱-۲ اجزای معادله ۱-۱ [۲۷]

$\Delta P_{c1} = \frac{v_f}{2} (G_{p2,in}^2 - G_{p1,in}^2) + \frac{K_{c1} v_f}{2} G_{p2,in}^2$
$\Delta P_{c2} = \frac{v_f}{2} (G^2 - G_{p2,in}^2) + \frac{K_{c2} v_f}{2} G^2$
$\Delta P_{e2} = \frac{v_f + x_{e,out} v_{fg}}{2} (G_{p2,out}^2 - G^2) + \frac{K_{e2} (v_f + x_{e,out} v_{fg})}{2} G^2$
$\Delta P_{e1} = \frac{v_f + x_{e,out} v_{fg}}{2} (G_{p1,out}^2 - G_{p2,out}^2) + \frac{K_{e1} (v_f + x_{e,out} v_{fg})}{2} G_{p2,out}^2$
$\Delta P_{sp,f} = \frac{2f_{sp,f} G^2 L_{sp,f} v_f}{d_h}$
$\Delta P_{sp,d} = \frac{2f_{app} G^2 L_{sp,d} v_f}{d_h}$

آن‌ها همچنین در این مطالعه شش تقریب رایج برای کانال‌های معمولی و چهار تقریب توسعه‌یافته که

^۱ Weilin Qu

به صورت اختصا صی مربوط به کانال‌های با ابعاد مینی و میکرو ه ستنند را مقایسه کرده‌اند. در سال ۲۰۰۴ تام^۱ یک مقاله‌ی مروری [۳۰] در مورد جوشش در میکروکانال‌ها را منتشر نمود. در همین سال کاندلیکار مکانیزم‌های انتقال حرارت در حین جریان جوشش در میکروکانال‌ها را تبیین نمود [۳۱]. در سال ۲۰۰۵ برای اولین بار ایده‌ی استفاده از نانو سیالات در برر سی عملکرد چاه‌های حرارتی تو سط چین^۲ مورد آنالیز قرار گرفت [۳۲]. وی در این پژوهش از ضرایب انتقال حرارت و اصطکاک که بر پایه‌ی مدل‌های تئوری و تقریب‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. وی نتیجه گرفت که استفاده از نانوسیال به جای سیال خالص به دلیل افزایش هدایت حرارتی سیال، باعث افزایش عملکرد چاه حرارتی می‌شود. موداوار در سال ۲۰۰۵ چاه‌های حرارتی میکروکانال را به‌عنوان خنک‌کن‌های در سیکل یخچال معرفی کرد [۳۳]. او از گاز $R - 134a$ به‌عنوان سیال عامل استفاده نمود. هم‌چنین بازه‌ی شار حرارتی اعمالی که در این پژوهش اعمال کرد بین ۳۱٫۶ الی ۹۳٫۸ وات بر سانتی‌متر مربع بود و در نهایت تقریب جدیدی برای پیش‌بینی افت فشار دوفازی در میکروکانال‌ها که دقت بهتری داشت را معرفی کرد. هم‌چنین تقریب جدیدی برای پیش‌بینی انتقال حرارت با توجه به کیفیت معرفی نمود. تا به این سال بیشتر تحقیقات با توجه به کاربرد این میکروکانال‌ها و هدایت حرارتی مس و آلومینیوم و سیلیکون بر روی این مواد متمرکز شده بود. اما در سال ۲۰۰۶ کیم^۳ [۳۴] با ساخت میکروکانال بر روی پلی دی متیل سیلکان اقدام به بررسی و مشاهده جوشش در میکروکانال نمود. وی شار حرارتی برابر ۱۸۰ تا ۵۰۰ کیلووات بر مترمربع به این میکروکانال اعمال کرد. وی با استفاده از یک دوربین به مشاهده الگوی جریان نیز پرداخت. وی مشاهده کرد که در میانه‌ی کانال نمونه در نزدیکی تعادل ترمودینامیکی صفر، مکانیزم جوشش غالب، جوشش هسته‌ای است. آقای تام در سال ۲۰۰۶ [۳۵] مروری کلی بر آخرین پیشرفت‌های جریان جوشش و دوفازی در میکروکانال‌ها داشتند. در سال ۲۰۰۷ موداوار [۳۶] ارزیابی بر تأثیر نانوسیالات بر انتقال حرارت تک فاز و دو فاز در میکروکانال‌ها داشتند.

^۱ John R. Thome

^۲ Reiyu Chein

^۳ Moo Hwan Kim

آن‌ها در این آزمایش از نانو سیال آلومینا به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند. از نتایج وی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱- ضریب هدایت حرارتی بالا نانوذرات نسبت به سیالات خالص ضریب انتقال حرارت تک فاز را برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته افزایش می‌دهد.

۲- افزایش نانوذرات افت فشار تک فاز را در مقایسه با سیال خالص در رینولدز مشابه افزایش می‌دهد.

۳- نانوذرات نباید برای چاه‌های حرارتی میکروکانال در حالت دو فاز مورد استفاده قرار گیرند. زمانی که جوشش شروع می‌شود ذرات شروع به ته‌نشینی کرده و در نزدیکی خروجی کانال‌ها به دلیل تبخیر موضعی تشکیل خوشه می‌دهند و باعث انسداد کانال می‌شوند.

در جدول ۱-۳ مزایا و معایب نانوسیالات را که از پژوهش فوق به‌دست آمده مشاهده می‌کنیم.

جدول ۱-۳ مزایا و معایب نانوسیالات [۳۶]

مزایا	معایب
ضریب انتقال حرارت بالا در حالت تک فاز، بخصوص برای جریان آرام	افزایش دمای دیواره در طول محور به دلیل کم کردن ظرفیت گرمایی ویژه
	افزایش توان پمپ به دلیل افت فشار بیشتر
	ته‌نشینی در طول مسیر جریان و احتمال انسداد و خرابی اجزای چرخه
	هزینه‌ی بالای پایداری نانوذرات

در همین سال در تایوان شین و چوانگ^۱ [۳۷]، پژوهشی را بر روی عملکرد چاه حرارتی میکروکانال با به کارگیری نانوسیال اکسید مس در آب بدون استفاده از ماده‌ی کمکی برای توزیع انجام دادند. آن‌ها میکروکانال‌های خود را بر روی قرص سیلیکونی به روش کنده کاری شیمیایی ایجاد کردند. آن‌ها در این پژوهش دریافتند که تئوری پیش‌بینی نشان می‌دهد که نانوذرات خنک‌کننده‌ی میکروکانال می‌توانند حرارت بیشتری را جذب کنند. این نتیجه با نتیجه‌ی آزمایش سازگار بود.

آگوستینی^۲، تام و همکارانشان در سال ۲۰۰۷ [۳۸] در یک پژوهش به بررسی آخرین پیشرفت‌های فناوری‌های مربوط به خنک کاری شار حرارتی بالا پرداختند. هدف آن‌ها از این مقاله‌ی مروری مقایسه بین فناوری‌های خنک کاری مختلف بود. هم‌چنین آن‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی خود در دانشگاه لوزان^۳ مشغول به پژوهش برای حل چالش خنک کردن تراشه‌های کامپیوتری نسل جدید که شار حرارتی بیشتری تولید می‌کنند هستند. آن‌ها در پژوهش خود چهار فناوری خنک کاری شامل میکروکانال‌های تک فاز، میکروکانال‌های دو فاز، محیط متخلخل و برخورد جت سیال را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. در جدول ۱-۴ مطالعات مربوط به خنک کاری میکروکانال‌ها با جریان تک فاز، در جدول ۱-۵ پژوهش‌های اخیر در حوزه میکروکانال‌ها با جریان دو فاز و در نهایت در جدول ۱-۶ خلاصه‌ی مقایسه‌ی این چهار روش را مشاهده می‌کنیم.

جدول ۱-۴ مطالعات بر روی میکروکانال‌های خنک‌کن تک فاز [۳۸]

محقق	هندسه و تعداد میکروکانال‌ها	جنس میکروکانال‌ها	عرض × ارتفاع / طول (میلی‌متر)	دبی (لیتر بر دقیقه)	سیال عامل

^۱ Jason Chuang

^۲ Bruno Agostini

^۳Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)

آب	0.282	0.056×0.320/10	سیلیکون	مستطیل / ۱۰۰	تا کرمن و پیس [۱۱]
آب	0.04	0.053×0.215/10	سیلیکون	مستطیل / ۶۴	لی ^۱ و هو ^۲ [۳۹]
آب	1.1	0.10×0.030/15	سیلیکون	مستطیل / ۷۵	پینبرگ ^۳ [۴۰]
آب	-	0.065×0.18/20	سیلیکون	مستطیل / ۱۶۰۰	کولگن ^۴ [۴۱]
آب	0.159	0.300×0.180/13	سیلیکون	مستطیل / ۱۰۰/۶۶/۲۵	پراشر ^۵ [۴۲]
آب و اتانول	0.253	0.300×2.700/55	مس	مستطیل / ۱۹	خی ^۶ [۴۳]
آب	1.002	0.210×2.00/12	آلومینیوم	مستطیل / ۲۱	خانگ ^۷ [۴۴]

جدول ۱-۵ مطالعات اخیر بر روی خنک‌کن‌های میکروکانال با جریان دوفازی [۳۸]

ضریب انتقال حرارت جابجایی	بیشترین	سیال	دبی	قطر	جنس	هندسه تعداد و جهت کانال‌ها	محقق
$\left(\frac{W}{cm^2 K}\right)$	گرمای انتقالی	عامل	(لیتر بر دقیقه)	معادل (میلی‌متر)	میکروکانال‌ها		
۱	۵	R134a	۰,۲	۰,۷۷	آلومینیوم	مستطیل / ۱۸ / عمودی	آگوستینی [۴۵]

^۱ P. S. Lee

^۲ J. C. Ho

^۳ R. H. W Pijenburg

^۴ E. G. Colgan

^۵ R. S. Prasher

^۶ Y. Q. Xie

^۷ H. Y. Zhang

۰,۷	۷,۴	R134a	۰,۶۴	۲,۰۱	آلومینیوم	مستطیل/۱۱/عمودی	آگوستینی و بنتمپ ^۱ [۴۶]
۳,۶	۷۱,۵	آب	۰,۰۱۵	۱,۴۵	فولاد ضدزنگ	دایروی/۱/عمودی	اسمیت ^۲ [۴۷]

جدول ۶-۱ مقایسه چهار فناوری [۳۸]

میکروکانال های تک فاز	میکروکانال های دو فاز	محیط متخلخل	برخورد جت سیال
۷۹۰	۲۷۵	۶۰۰	۱۸۲۰
افزایش حرارت دفع شده $\frac{W}{cm^2}$			
$\frac{kPa}{m}$ ۲۲۰۱۱	$\frac{kPa}{m}$ ۳۹	$\frac{kPa}{m}$ ۲۳۱۷۵۰	kPa ۲۴۱
افت فشار در بیشینه شار حرارتی دفع شده			
۰,۴۹۲ تا ۰,۰۸	۰,۰۷ تا ۲,۵	۰,۰۹۲ تا ۰,۷۶۸	۰,۲۰۳ تا ۰,۰۳۴۵
محدوده مقاومت حرارتی $\frac{W}{cm^2 K}$			

^۱ A. Bontemps

^۲ B. Sumith

مشکلات آب‌بندی، ضریب انتقال حرارتی غیر یکنواخت، نرخ جریان بالا، خوردگی	نیاز به توان پمپ بالا، عدم وجود مدل‌های فیزیکی برای پیش‌بینی انتقال حرارت	مکانیزم انتقال حرارت ناشناخته، وابستگی ضریب انتقال حرارت به کیفیت بخار، جریان‌های برگشتی و ناپایداری؛ وجود شار حرارتی بحرانی	افت فشار بالا، عملکرد پایین برای خنک‌کن‌ها، ایجاد گرادیان دما در طول تراشه	معایب اصلی
ضریب انتقال حرارت بالا	عملکرد خنک کاری بالا، افزایش سطح انتقال حرارت، روند ساخت آسان و کم‌هزینه	نرخ دبی جرمی پایین، ضریب انتقال حرارت بسیار بالا، افت فشار کم	عملکرد خنک کاری بالا، شناخت خوب پدیده‌شناسی فیزیکی	مزایای اصلی

در سال ۲۰۰۸ گاریملا^۱ و حریرچیان از مرکز تحقیقات فناوری خنک کاری^۲ [۴۸] پژوهشی بر روی گاز $FC - 77$ در داخل چاه حرارتی میکروکانال که بر روی قرص سیلیکونی ساخته شده بود انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش به تأثیر دبی جرمی و اندازه کانال بر رژیم‌های جریان جوشش، منحنی جوشش و ضریب انتقال حرارت پرداختند. در همین سال تام و همکارانش [۴۹] به بررسی عملکرد خنک کاری دوفازی مربوط به یک تراشه تخت شار حرارتی بالا با کمک گاز سردساز $R236fa$ در چاه حرارتی میکروکانال از جنس سیلیکون پرداختند. شار

^۱ Suresh V. Garimella

^۲ Cooling Technology Research Center, Purdue University

حرارتی اعمالی در این آزمایش ۲۵۵ وات بر سانتی متر مربع بود.

گاریملا و لی^۱ در سال ۲۰۰۸ [۵۰] به مشاهده‌ی جریان جوشش در آرایه‌ای از میکروکانال‌های موازی در یک نمونه آزمایشگاهی سیلیکونی که یک ناحیه گرم به‌عنوان گرما ساز به آن متصل شده است پرداختند. عرض میکروکانال‌ها بین ۱۰۲ تا ۹۹۷ میکرون با عمق ۴۰۰ میکرون بود. آن‌ها در پژوهش خود در ناحیه جوشش مادون سرد بودند. هم‌چنین آن‌ها به ارائه‌ی مدلی جدید برای تقریب افت فشار پرداختند.

در سال ۲۰۰۹ الناز کرمانی و امیر شو شتری در دانشگاه مری لند [۵۱] آزمایشی برای خنک کاری سلول‌های خورشیدی متمرکز شده با استفاده از چاه حرارتی چند میکروکانال انجام دادند. آن‌ها به مشاهده عملکرد انتقال حرارت پرداختند. بیشینه‌ی شار حرارتی در این حالت ۷۵ وات بر سانتی متر مربع بود که متناسب با شرایط تمرکز ۱۰۰۰ خورشید با بازده ۲۵ درصد سلول خورشیدی و تشعشع خورشیدی برابر ۱۰۰۰ وات بر مترمربع برای جاییکه جابه‌جایی یا همرفتی از سطوح بالایی یا پایینی وجود ندارد.

از پارامترهای مهمی که در این رویکرد وجود دارد کمینه شدن مقاومت حرارتی بین سلول خورشیدی گرم شده و سطح میکروکانال است. هم‌چنین تمام اجزای موردنیاز برای چنین وسیله‌ای سایز بسته‌بندی را کاهش می‌دهد که این امر موجب معرفی آیین‌های متمرکز کننده با قدرت بالا می‌شود.

در سال ۲۰۱۱ وفایی [۵۲] انتقال حرارت جریان جوشش نانو سیال آلومینا در یک میکروکانال مشاهده کرد. وی بیشتر بر روی شار حرارتی بحرانی در این پژوهش متمرکز شد. در سال ۲۰۱۲ حریرچیان و گاریملا [۵۳] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار جریان جوشش در میکروکانال

^۱ Poh-Seng Lee

پرداختند. آن‌ها میکروکانال را به صورت فین در نظر گرفتند. در سال ۲۰۱۱ چن^۱ و گاریملا [۵۴] به پژوهش و مشاهده‌ی جریان جو شش سیال $FC - 77$ در چاه حرارتی سیلیکونی به ابعاد $12,7 \times 12,7$ میلی‌متر که شامل ۶۰ میکروکانال موازی بود پرداختند. هر یک از این میکروکانال‌ها عرض ۱۰۰ میکرون و عمق ۳۸۹ میکرون داشتند. آن‌ها به اندازه‌گیری توزیع انتقال حرارت محلی و افت فشار در طول لوله پرداختند. این آزمایش در ۵ دبی حجمی متفاوت در بازه‌ی ۲۰ تا ۸۰ میلی‌لیتر بر دقیقه با دمای مادون سرد ۲۶ کلوین در ورودی انجام شد و هر ۵ دبی شامل بازه‌ی شار حرارتی از تک فاز تا زمانی که شار حرارتی بحرانی دو فاز اتفاق بی افتد می‌شدند.

یکی از اصلی‌ترین نتایج این کار این بود که به علت تغییرات در الگوی جریان در حین ناپایداری‌های جریان ضریب انتقال حرارت در هر دو ناحیه‌ی پایین‌دست و بالادست جریان بهبود یافت. در ناحیه بالادست جریان افزایش انتقال حرارت در زمانی که شیب منحنی دمای دیواره با افزایش شار حرارتی کاهش یافت مشاهده شد. در ناحیه‌ی پایین‌دست جریان ضریب انتقال حرارت در حین بازه‌ی ناپایداری جریان تمایل به ثابت بودن داشت اما با افزایش شار حرارتی کاهش یافت. اندازه‌گیری‌های افت فشار در این کار نشان داد که به دلیل تعادل بین شتاب و اصطکاک سیال افت فشار در جریان دوفازی در میکروکانال‌ها اغلب به صورت خطی با افزایش شار حرارتی افزایش می‌یابند و کم‌ترین وابستگی به نرخ جریان را دارند. این عدم وابستگی تنها تا زمان رخ دادن شار حرارتی بحرانی صادق است.

در همین سال پللیکون^۲ و ارتگا^۳ [۵۵] شبیه‌سازی از جریان دوفازی و انتقال حرارت در مینی و میکروکانال‌ها انجام دادند. آن‌ها به معرفی میکروکانال‌ها به عنوان خنک‌کن برای سلول‌های

^۱ Tailian Chen

^۲ Devin Pellicone

^۳ Alfonso Ortega

فتولتائیک متمرکز پرداختند.

در سال ۲۰۱۲ سیگ^۱ و هاریکریشنا^۲ [۵۶] آزمایشی برای مطالعه‌ی هیدرودینامیکی نانوسیالات در میکروکانال انجام دادند. برای این پژوهش سه میکروکانال با قطرهای هیدرولیکی ۱۳۰، ۲۱۱ و ۳۰۰ میکرون بر روی قرص‌های سیلیکونی به روش فوتولیتوگرافی و کنده‌کاری تر ساختند. نانوسیالات آلومینا با غلظت‌های ۰٫۲۵ و ۰٫۵ و ۰٫۱ درصد حجمی با اندازه ذرات ۴۵ و ۱۵۰ نانومتر آماده شد. علاوه بر پژوهش آزمایشگاهی آن‌ها به بررسی عددی نیز پرداختند. آن‌ها دریافتند که نانو سیالات همانند سیال تک فاز در میکروکانال رفتار نمی‌کند. ضریب اصطکاک نانو سیالات در میکروکانال وابسته به اندازه کانال، غلظت ذره و ظاهر شدن جریان آشفته است. در سال ۲۰۱۳ تیبرسیا^۳ و ریب تسکی^۴ [۵۷] یک مقاله‌ی مروری بر جریان جوشش در کانال‌های با مقیاس میکرون منتشر کردند. در سال ۲۰۱۴ یانگ^۵ و پیلز^۶ [۵۸] به بررسی پدیده‌ی جریان جوشش در یک جریان حلقوی در میکروکانال‌ها پرداختند. آن‌ها از آب مقطر به‌عنوان سیال عامل در میکروکانال‌های سیلیکونی استفاده کردند. در همین سال ژاو^۷ و فرانس^۸ [۵۹] کاربردی دیگر از میکروکانال‌ها را معرفی کردند. آن‌ها با توجه به انتقال حرارت جوشش مادون سرد، سینک حرارتی میکروکانال را برای سیستم خنک کاری ماشین‌های هیبریدی معرفی کردند. در سال ۲۰۱۴ شیر^۹ و موز^{۱۰} [۶۰] پژوهشی در رابطه با آنالیز حرارتی صفحه جاذب کلکتور خورشیدی با میکروکانال انجام دادند.

^۱ Pawan K. Singh

^۲ P.V. Harikrishna

^۳ Cristiano Bigonha Tibirica

^۴ Gherhardt Ribatski

^۵ Fanghao Yang

^۶ Yoav Peles

^۷ Weihuan Zhao

^۸ David M. France

^۹ G.S.F Shire

^{۱۰} R.W. Moss

در سال ۲۰۱۴ کومار^۱ و کادام^۲ [۶۱] راه حل خنک کاری در قرن ۲۱ را میکروکانال معرفی کردند. آن‌ها در یک پژوهش مروری بر مقالات گذشته به روش‌های مختلف ساخت میکروکانال‌ها، انتقال حرارت و تقریب‌های افت فشار پرداختند. در سال ۲۰۱۵ چاندرا^۳ [۶۲] تحقیق آزمایشگاهی و آنالیزی بر روی چاه‌های حرارتی آلومینیومی پرداختند. هدف آن‌ها معرفی چاه حرارتی و مطالعه مشخصات انتقال حرارت در میکروکانال‌ها به منظور استفاده برای خنک کاری قطعات الکترونیکی بود. در همین سال بودو^۴ [۶۳] یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی جوشش جریان آب در مینی کانال‌ها با نرخ جریان کم را به وسیله آب مقطر و نانوسیال مس انجام داد.

همان‌طور که تا به اینجا دیدیم تحقیق و پژوهش در زمینه‌ی انتقال حرارت در میکروکانال در هر دو حالت تک فاز و دو فاز بسیار مورد علاقه‌ی پژوهشگران بوده است. اما دو مرکز تحقیقات دانشگاه پوردو و دانشگاه پلی تکنیک لوزان به صورت خاص و دقیق‌تر پیرامون این موضوع فعالیت می‌کنند. در سال‌های اخیر اغلب پژوهش‌ها به صورت بسیار جزئی‌تر مثلاً در زمینه‌ی شار حرارتی بحرانی یا جوشش گازهای موسوم به *CFC* ها که اغلب کاربرد در یخچال‌ها دارند و یا ناپایداری و غیره پرداختند. به همین منظور از ذکر آن‌ها خودداری کردیم. لیست تعدادی از مقالات در انتهای پایان‌نامه آورده شده است.

^۱ Ritunesh Kumar

^۲ Sambhaji T. Kadam

^۳ P. Chandra Sekhar

^۴ Mounir Boudouh

فصل دوم

تقریب‌های جریان اجباری جوشش

روابط بسیار زیادی برای انتقال حرارت در جریان جوشش پیشنهاد شده‌اند. هم‌چنین مقالات مروری و تألیفات در رابطه با انتقال حرارت و تقریب‌های آن و متون درسی در ارتباط با جوشش و جریان‌های دوفازی بسیار متعدد هستند. از جمله‌ی معروف‌ترین و معتبرترین متون درسی می‌توان به کتاب آقای کولیر^۱ و تام [۶۴]، آقای تانگ [۶۵]، آقای کاندلیکار [۶۶]، آقای غیاثیان [۶۷] در بین دیگر کتاب‌ها اشاره کرد. اگرچه تقریب‌های جدیدی نیز علاوه بر تقریب‌های اشاره‌شده در کتاب‌های فوق اخیراً منتشر شده‌اند. بسیاری از این تقریب‌ها به صورت تجربی به دست آمده‌اند، که اغلب بدون پایه و اساس تئوری محکمی هستند، و یا بر اساس پایگاه‌های داده‌ای بسیار زیاد می‌باشند. اگرچه بسیاری از این تحقیقات در طول زمان ثابت شده‌اند که روابط نسبتاً دقیقی هستند. اغلب تقریب‌های اخیر در واقع شامل داده‌های آزمایشگاهی هستند که اخیراً با امکانات آزمایشگاهی بسیار پیچیده مشاهده شده‌اند. برخی از این داده‌های آزمایشگاهی شامل داده‌هایی در حوزه‌ی مینی کانال‌ها نیز می‌باشند. در این فصل یک مرور خلاصه بر آخرین گروه از این تقریب‌ها می‌پردازیم.

۲-۲ تقریب‌های جریان جوشش

همان‌طور که در بالا اشاره شد روابط جریان جوشش بسیار متعدد هستند. اگرچه تجربه‌ی کاربر منجر به شناسایی دقیق‌ترین آن‌ها بین بقیه می‌شود. برای مثال گانگور^۲ و وینترتون^۳ [۶۸]، یک لیست از محققان را ارائه کرده‌اند که روابط نسبت موفق برای جوشش مادون سرد^۴ و جوشش اشباع^۵ معرفی کرده‌اند. اغلب روابط اخیر در حقیقت شامل روابطی می‌شوند که این دو تهیه کردند. به‌طور کلی تقریب‌های جریان جوشش می‌توانند به سه گروه تقسیم شوند. اولین گروه، گروه تام است. قدیمی‌ترین

^۱ John G. Collier

^۲ Gungor

^۳ Winterton

^۴ Subcooled Boiling

^۵ Saturated Boiling

و شاید موفق‌ترین گروه، حداقل در جریان جوشش در مقیاس ماکرو هست. این تقریب‌ها بر اساس این واقعیت است که هم جوشش هسته‌ای^۱ و هم مکانیزم جابه‌جایی اجباری هردو در انتقال حرارت کلی سهمیه هستند و در واقع ضریب انتقال حرارت به صورت حاصل جمع دو عبارت نمایش داده می‌شود. دومین گروه را می‌توان گروه مدل‌های مجانبی^۲ (مدل جریان مجزا) نام‌گذاری کرد. این تقریب‌ها سهمی را به صورت جداگانه برای جوشش هسته‌ای و جابه‌جایی اجباری در انتقال حرارت در نظر می‌گیرند و معمولاً به این صورت فرمول‌بندی می‌شوند که برای محدوده‌ی مشخصی از کیفیت رویکرد جوشش هسته‌ای و برای مابقی با رویکرد جابه‌جایی خالص روابط را توسعه می‌دهند. گسترده‌ترین شکل از این تقریب‌ها به صورت زیر است:

$$h_{TP} = (h_{nb}^n + h_{cb}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (1-2)$$

که در آن n عدد صحیح است. در نهایت سومین گروه از تقریب‌ها وابسته به الگوی جریان هستند. در این نوع تقریب‌ها فرآیند انتقال حرارت به صورت نیمه مکانیکی مدل می‌شود، و این مدل با توجه به الگوی جریان^۳ است. باید اشاره کنیم که مدل آخر در مقایسه با دو مدل ذکرشده دیگر عمومیت کمتری دارد. علت این امر در درجه‌ی اول به دلیل پیچیدگی و سپس به دلیل سختی‌هایی در ارتباط با حدس رژیم‌های جریان دوفازی در سامانه‌های جوشش است. در واقع روابط اخیر مربوط به دو گروه اول هستند. چن^۴ [۶۹] یکی از موفق‌ترین و معتبرترین تقریب‌ها را برای انتقال حرارت در جریان جوشش ارائه کرد. تقریب چن از تقریب‌های گروه اول است و فرض می‌کند انتقال حرارت کلی شامل هر دو مکانیزم جوشش هسته‌ای و جوشش جابه‌جایی است. اگرچه جوشش هسته‌ای هنگامی که تأثیر جابه‌جایی اجباری افزایش می‌یابد (هنگامی که کیفیت جریان افزایش می‌یابد) نادیده گرفته

^۱ Nucliated Boiling

^۲ Asymptotic Models

^۳ Flow Pattern

^۴ J.C. Chen

می‌شود. تقریب چن به صورت زیر است:

$$h = \frac{0.00122 k_1^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_1^{0.49}}{\sigma_{0.5} \mu_l^{0.29} H_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} (T_w - T_s)^{0.24} \Delta P^{0.75} S \quad (2-2)$$

$$+ \frac{0.023 \left[\frac{DG(1-x)}{\mu_l} \right]^{0.8} \left(\frac{c_{pl} \mu_l}{k_l} \right) k_l}{D} F$$

که در رابطه‌ی فوق S فاکتور خنثی و F یک پارامتری است که برای طبیعت دوفازی جریان به حساب می‌آید. اخیراً گانگور و وینرتون تلاشی برای توسعه‌ی تقریب چن انجام دادند. آن‌ها با استفاده از یک بانک اطلاعاتی گسترده تقریب چن را برای هردو جوشش مادون سرد و جوشش اشباع توسعه دادند.

$$h_{tp} = E h_l + S h_{pool} \quad (3-2)$$

$$h_l = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{k_l}{d} \right) \quad (4-2)$$

$$Re = \frac{G(1-x)d}{\mu_l} \quad (5-2)$$

$$E = f(X_{tt}, Bo) \quad (6-2)$$

در روابط بالا پارامتر h_{pool} نشان‌دهنده‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش استخری است. پارامتر E یک فاکتور افزایشدهنده^۱ و S یک فاکتور خنثی^۲ است. فاکتور S برای خنثی کردن اثر جوشش هسته‌ای هنگامی که کیفیت افزایش می‌یابد است. این دو عبارات تجربی برای E و S نیز به دست آوردند.

شاه^۳ [۷۰]، تقریب زیر را برای جوشش اشباع معرفی کرد:

^۱ Enhancement Factor

^۲ Suppression Factor

^۳ M.M. Shah

$$q = [230(\dot{m}h_{lv})^{-0.5}h_{lo}(\Delta T_{sat})]^2 \quad (7-2)$$

جایی که h_{10} از رابطه‌ی دیتوس-بولتر^۱ [۷۱]، با فرض اینکه تمام خنک‌کن مایع اشباع باشد، به دست می‌آید.

$$\frac{h_{lo}d}{k_{lo}} = 0.23Re_{lo}^{0.8}Pr_{lo}^{0.4} \quad (8-2)$$

کلیمنکو^۲ [۷۲ و ۷۳] تقریبی برای جریان جوشش در هر دو حالت افقی و عمودی ارائه کردند.

$$h_{tp} = h_{NB} \quad N_{CB} < 1.2 \times 10^4 \quad (9-2)$$

$$h_{tp} = h_{NB} \text{ و } h_{CB} \text{ مقدار بزرگ‌ترین} \quad 1.2 \times 10^4 < N_{CB} < 2 \times 10^4 \quad (10-2)$$

$$h_{tp} = h_{CB} \quad N_{CB} > 2 \times 10^4 \quad (11-2)$$

$$h_{NB} = C \left(\frac{k_l}{b}\right) Pe_*^{0.6} \left(\frac{pb}{\sigma}\right)^{0.54} Pr^{-0.33} \left(\frac{k_w}{k_l}\right)^{0.12} \quad (12-2)$$

$$h_{CB} = 0.087 \left(\frac{k_l}{b}\right) Re_m^{0.6} Pr_l^{0.167} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.2} \left(\frac{k_w}{k_l}\right)^{0.09} \quad (13-2)$$

$$N_{CB} = \frac{Gh_{fg}}{q} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right)\right] \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (14-2)$$

$$Pe_* = \frac{qb}{c_p \rho_g \alpha_l} \quad (15-2)$$

$$Re_m = \frac{U_m b}{\mu_l} \quad (16-2)$$

$$U_m = \frac{G}{\rho_l} \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1\right)\right] \quad (17-2)$$

^۱ Dittus-Boelter

^۲ Klimenko

$$b = \left[\frac{\sigma}{g\Delta\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18-2)$$

کاندلیکار و همکارانش [۷۴ و ۷۵] یک تقریب معتبر برای جریان جوشش ارائه کردند.

$$h = \max\{h_{NBD}, h_{CBD}\} \quad (19-2)$$

$$h_{NBD} = 0.6683Co^{-0.2}(1-x)^{0.8}f_2(Fr_{lo})h_{lo} + 1058Bo^{0.7}(1-x)^{0.8}F_{fl}h_{lo} \quad (20-2)$$

$$h_{CBD} = 1.136Co^{-0.9}(1-x)^{0.8}f_2(Fr_{lo})h_{lo} + 667.2Bo^{0.7}(1-x)^{0.8}f_2(Fr_{lo})h_{lo} \quad (21-2)$$

$$f_2(Fr_{lo}) = \min\{1, 25Fr_{lo}\} \quad (22-2)$$

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{\rho^2 g D_H} \quad (23-2)$$

پارامتر h_{lo} نیز از رابطه‌ی ۸-۲ به دست می‌آید. هم‌چنین می‌توان h_{lo} را نیز از تقریب‌های

گایلینسکی^۱ [۷۶] و تپکو^۲ [۷۷]، با توجه به مقدار به دست آورد. F_{fl} یک پارامتر وابسته به سیال

است که مقادیر آن برای سیالات انتخاب‌شده در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲ مقادیر پیشنهادی برای پارامتر F_{fl}

۱,۰	آب
۱,۳	R - 11
۱,۵	R - 12
۱,۳۱	R - 13

^۱ Gnielinski

^۲ Petukov

۲,۲۰	$R - 22$
۱,۳۰	$R - 113$
۱,۶۳	$R - 134a$
۱,۱۰	$R - 152a$

برای برخی سیالات که در جدول آورده نشده‌اند تقریب فارستر^۱ و زوبر^۲ [۷۸]، برای انتقال حرارت جوشش هسته‌ای استفاده می‌شود. اعداد C_0 عدد جابه‌جایی و B_0 عدد جوشش به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Bo = \frac{q}{Gh_{lv}} \quad (2-24)$$

$$Co = \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \left[\frac{1-x}{x}\right]^{0.8} \quad (2-25)$$

۲-۳ بیانات کلی در مورد جریان جوشش در میکروکانال‌ها

در تحقیقات اخیر بر روی مینی و ماکرو کانال‌ها، علاقه‌ی قابل توجهی در انتقال حرارت جوشش وجود دارد. این امر به دلیل پتانسیل بالای میکروکانال‌ها است. میکروکانال‌ها در بسیاری از سامانه‌های صنعتی مثل سلول‌های سوختی، واحدهای یخچالی، ادوات فرآیندهای شیمیایی و خنک کاری میکروالکترونیک‌ها قابل استفاده هستند.

تعریف دقیق میکروکانال‌ها موضوع مورد اختلاف است. یکی از جدیدترین تعریف‌ها با توجه به

^۱ Forster

^۲ Zuber

سو^۱ و گریفیت^۲ [۷۹] است. بر طبق این تعریف یک کانال استوانه‌ای به قطر D یک میکروکانال است اگر $D = 0.3 b$ باشد. که b مقیاس طولی لاپلاس است. در رابطه فوق برای کانال‌های با مقاطع غیر دایروی از قطر هیدرولیکی استفاده می‌کنیم.

در تعریف دیگر توسط مهندال^۳ و همکارانش [۸۰]، طبقه‌بندی کانال‌ها به صورت زیر ارائه شد:

۱- میکروکانال‌ها؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بین ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر

۲- مینی کانال‌ها؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بین ۱۰۰ میکرومتر تا ۱ میلی‌متر

۳- ماکرو کانال‌ها؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بین ۱ تا ۶ میلی‌متر

۴- کانال‌های معمولی؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بیشتر از ۶ میلی‌متر

و در تعریف دیگر که بیش‌ترین ارجاع را داشته است، توسط آقای کاندلیکار طبقه‌بندی کانال‌ها به صورت زیر تعریف شده است:

۱- میکروکانال‌ها؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرومتر

۲- مینی کانال‌ها؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بین ۲۰۰ میکرومتر تا ۳ میلی‌متر

۳- کانال‌های معمولی؛ کانال‌هایی با قطر هیدرولیکی بیش از ۳ میلی‌متر

هم‌چنین پالم^۴ [۸۱] یک تعریف کلی از میکرو کانال ارائه داد. او میکرو کانال‌ها را به عنوان المان‌هایی حرارتی معرفی کرد که نظریه‌های کلاسیک قادر به پیش‌بینی درستی از انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نباشند. استفان^۵ یک سیستم در مقیاس میکرو را این‌طور تعریف کرد که سامانه‌ای که پدیده‌های معمولی در مقیاس ماکرو همین سیستم غایب باشد.

^۱ Suo

^۲ Griffith

^۳ Mehendale

^۴ B. Palm

^۵ Stephan

اغلب مطالعات در این حوزه نشان داده‌اند که جوشش هسته‌ای و جابه‌جایی هر دو در انتقال حرارت سهیم هستند. در بسیاری از مطالعات از تجهیزات پیشرفته استفاده شده است که اطلاعات ارزشمندی در مورد ضریب انتقال حرارت دمای بالک سیال، دمای دیواره و کیفیت را به ما می‌دهد. در مورد میکروکانال‌ها اندازه‌گیری چنین اطلاعاتی بسیار مشکل است.

ولاسی^۱ و همکارانش [۸۲]، مشاهده کردند که اکثر آزمایش‌های جریان جوشش ضریب انتقال حرارت جوشش محلی یا شار حرارتی را برحسب کیفیت بخار تعادلی، اندازه‌گیری شده‌اند. تران^۲ و همکارانش [۸۳]، ضریب انتقال حرارت محلی برای تبخیر گاز $R - 113$ در کانال افقی کوچک به شار حرارتی وابسته است و وابستگی کمی به دبی جریان و یا کیفیت دارد. در تحقیق لین^۳ و همکارانش [۸۴]، از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت با کاهش کیفیت افزایش یافته است. مشکلات فنی متعددی وجود دارد و همین امر مطالعه‌ی جریان جوشش در مینی و میکروکانال‌ها را به یک چالش تبدیل کرده است.

قابل ذکر است که جنجال چشمگیری در انتقال حرارت در جریان تک فاز در میکروکانال‌ها نیز وجود دارد. در حالی که برخی محققان گزارش داده‌اند که تقریب‌های مقیاس ماکرو برای جریان آشفته با داده‌های آزمایشگاهی میکروکانال تطابق ندارد، برخی دیگر تطابق قابل قبول در این حوزه را گزارش کرده‌اند.

آگوستین^۴ و همکارانش [۸۵]، تطابق مناسبی بین داده‌هایشان و تقریب گایلینسکی [۷۶]، مشاهده کردند. این تقریب دقت خوبی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت مجرای مستطیلی و مینی کانال‌ها از خود نشان داده است. این تقریب به صورت زیر است.

^۱ Vlassie

^۲ Tran

^۳ Lin

^۴ Agostini

$$Nu = \frac{\frac{f}{2}(Re - 1000)Pr}{1 + 12\sqrt{\frac{f}{2}}(Pr - 1)} \quad (2-26)$$

که بازه‌ی قابل قبول برای تقریب فوق به صورت زیر است:

$$2300 < Re < 10^6 \quad 0.6 < Pr < 10^5$$

۲-۴ تقریب‌های انتقال حرارت جوشش در کانال‌های کوچک

در این بخش برخی تقریب‌های موجود را مجدد به صورت جزئی‌تر بررسی خواهیم کرد. همچنین به توصیف روش که چگونه توسعه پیدا کرد و بازه‌ی قابل کاربرد این تقریب‌ها را بیان خواهیم نمود. باید متذکر شویم که در مقایسه‌ای بین رایج‌ترین تقریب‌ها و داده‌های آزمایشگاهی مینی و میکروکانال‌ها پیش از این توسط برخی محققان انجام شده است. همان‌طور که در بخش قبل گفتیم ولاسی و همکارانش [۸۲] در جدول ۲-۲ تقریب‌های مناسب و مورداستفاده در تحلیل میکرو و مینی کانال‌ها را آورده است.

جدول ۲-۲ تحلیل‌های مناسب برای میکروکانال‌ها [۸۲]

تقریب	محقق
$h^2 = (Sh_{spb})^2 + (Fh_L)^2$	لی و وینترتون
$h = 55\rho_g^{0.12}(-\log_{10}\rho_g)^{-0.55}M^{-0.5}q^{0.67}$	کوپر ^۱
$Nu = 30Re^{0.857}Bo^{0.714}$	لازارک ^۲ و بلک ^۳

^۱ Cooper

^۲ Lazarek

^۳ Black

$h = 840 \times 10^3 (Bo^2 \times We)^{0.3} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{-0.4}$	تران
--	------

لی و موداوار [۸۶] نیز تقریب‌هایی برای جریان جوشش تألیف کرده‌اند و آن‌ها را با داده‌های آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. به‌علاوه این‌که این دو محقق یک مجموعه‌ای از سه تقریب برای جریان جوشش توسعه دادند. این سه مجموعه شامل بازه‌های کم، متوسط و بالا از پارامتر کیفیت است.

در این بخش تقریب‌های زیر را معرفی خواهیم کرد:

۱- لیو و وینرتون [۸۷]

۲- کاندلیکار [۸۸]

۳- چن [۶۹]

۴- شاه [۷۰]

۵- گانگور و وینرتون [۶۸]

۶- بجورگ^۱ و همکاران [۸۹]

۷- کلیمنکو [۷۲ و ۷۳]

۸- استینر^۲ و تابورک^۳ [۹۰]

۹- ترن و همکاران [۸۳]

روش تام و همکاران [۹۱]، یک مدل برای پیش‌بینی ضرایب انتقال حرارت دینامیکی محلی را فرمول‌بندی کرد. تمرکز این مدل بر روی اتفاقاتی است که در یک نقطه در دیواره کانال که در معرض

^۱ Bjorge

^۲ Steiner

^۳ Taborek

یک رژیم بخار- مایع که تحت حباب‌های طویل و یک شار حرارتی ثابت است. آن‌ها نتیجه گرفتند که جوشش هسته‌ای نقش اصلی را در جوشش در میکرو و مینی کانال‌ها ایفا نمی‌کند. بر اساس یک مدل تبخیر سه منطقه‌ای، آن‌ها نشان دادند که گذار از تبخیر فیلم نازک مایع به حباب‌های طویل مکانیزم غالب در انتقال حرارت است. پارامترهای ورودی برای مدل آن‌ها کیفیت تعادلی، شار حرارتی، قطر کانال، نرخ جرمی جریان و خواص ترموفیزیکی سیال در فشار اشباع محلی هستند. در این مدل آن‌ها فرض کردند که هسته حباب‌ها به سرعت رشد کرده و به اندازه کانال می‌رسند. این حباب‌ها یک فیلم مایع را بین خودشان و دیواره‌ی ورودی کانال به دام می‌اندازند. آن‌ها نشان دادند که ضخامت فیلم مایع نقش اصلی در انتقال حرارت را ایفا می‌کند.

۲-۵ تقریب لیو و ونیترتون [۸۷]

این تقریب رایج‌ترین تقریب برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جریان جوشش است. همانند اغلب تقریب‌های جریان اجباری جوشش، این تقریب در حقیقت از دو ضریب انتقال حرارت تشکیل شده است. یکی نشان‌دهنده‌ی جوشش هسته‌ای و دیگری انتقال حرارت جابه‌جایی است. انتقال حرارت جوشش هسته‌ای با استفاده از تقریب کوپر [۹۲]، و برای انتقال حرارت جابه‌جایی از تقریب دیتوس بولتر [۷۱]، استفاده می‌شود. این دو محقق روش پیشنهادی کوتاه‌تلاذی^۱ [۹۳] را برای ترکیب اثر جوشش هسته‌ای و جابه‌جایی به کار گرفتند.

$$h_{TP} = \sqrt{\left[\frac{h_{exp}}{h_{pool}}\right]^2 - \left[\frac{Fh_l}{h_{pool}}\right]^2} \quad (27-2)$$

$$F = \left[1 + xPr_l \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1\right)\right]^{0.35} \quad (28-2)$$

$$S = (1 + 0.055F^{0.1}Re_l^{0.16}) \quad (29-2)$$

^۱ Kutateladze

$$q = h_{TP}(T_w - T_s) \quad (30-2)$$

$$h_{TP} = \sqrt{(Fh_l)^2 + (Sh_{pool})^2} \quad (31-2)$$

در روابط فوق اگر کانال تحت حرارت افقی باشد و عدد بی بعد فرود کم تر از ۰,۰۵ باشد آنگاه باید به ترتیب عبارت را زیر را در F و S.

$$Fr = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D_h} \quad (32-2)$$

$$e_F = Fr^{0.1-2Fr} \quad (33-2)$$

$$e_S = \sqrt{Fr} \quad (34-2)$$

در جوشش مادون سرد نیز روابط زیر حکم فرما هستند.

$$q = \sqrt{(Fh_l \Delta T_b)^2 + (Sh_{pool} \Delta T_s)^2} \quad (35-2)$$

$$\Delta T_b = T_w - T_b \quad (36-2)$$

$$\Delta T_s = T_w - T_s$$

۶-۲ تقریب کاندلیکار [۸۸]

تقریب کاندلیکار به صورت زیر است:

$$h = \max\{h_{NBD}, h_{CBD}\} \quad (19-2)$$

$$h_{NBD} = 0.6683Co^{-0.2}(1-x)^{0.8} f_2(Fr_{lo})h_{lo} + 1058Bo^{0.7}(1-x)^{0.8} F_{fl}h_{lo} \quad (20-2)$$

$$h_{CBD} = 1.136Co^{-0.9}(1-x)^{0.8} f_2(Fr_{lo})h_{lo} + 667.2Bo^{0.7}(1-x)^{0.8} f_2(Fr_{lo})h_{lo} \quad (21-2)$$

$$f_2(Fr_{lo}) = \min\{1, 25Fr_{lo}\} \quad (22-2)$$

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{\rho^2 g D_H} \quad (23-2)$$

این تقریب برای کانال‌هایی کاربردی است که سیال عامل در آن‌ها آب و ماده سردکننده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری برای حالتی که سیال کاملاً مایع است از تقریب‌های گلیلنسیکی [۷۶] یا پتکو و پیوف [۷۷]، با توجه به مقدار عدد رینولدز محاسبه می‌شود. پارامتر F_{fl} یک پارامتر سطحی سیال است که توسط کاندلیکار در جدول ۱-۲ ارائه شده است. کاربردپذیری این تقریب برای جوشش در مینی کانال‌ها است. وی به این نکته اشاره کرد که پارامتر $f_2(Fr_{lo})$ در تقریب وی به‌منظور به‌حساب آوردن تأثیر لایه‌بندی جریان در کانال‌های افقی است. بنابراین $f_2(Fr_{lo}) = 1$ متناسب با مینی کانال‌هایی است که لایه‌لایه شدن جریان در آن‌ها رخ نمی‌دهد. وی از مقایسه‌ی تقریب خود با پایگاه‌های داده‌های آزمایشگاهی سه نتیجه زیر را برداشت کرد.

- ۱- این تقریب برای زمانی که Re_{lo} کم‌تر از ۱۶۰۰ باشد کاملاً مناسب است. در این حالت ضریب انتقال حرارت از تقریب‌های جابه‌جایی اجباری جریان آرام به دست می‌آید.
- ۲- برای $1600 < Re_{lo} < 3000$ جایی که گذار از ناحیه آرام به آشفته رخ می‌دهد، انحرافی بین تقریب داده‌ها ایجاد می‌شود. یک روش برون‌یابی مناسب برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت و هم‌چنین داده‌های آزمایشی بیشتر در این حالت نیاز است.
- ۳- برای $Re_{lo} > 3000$ تقریب شاید مناسب باشد. در این حالت معمولاً از تقریب جریان آشفته برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت استفاده می‌شود.

۷-۲ تقریب چن [۶۹]

تقریب چن یکی از پرارجاع‌ترین تقریب‌هاست. ضریب انتقال حرارت از رابطه زیر به‌دست

می آید:

$$h = h_{mic} + h_{mac} \quad (37-2)$$

که عبارت اول نشان دهنده‌ی جوشش هسته‌ای و عبارت دوم نشان دهنده‌ی انتقال حرارت جابه‌جایی است. رویکرد وی در جوشش اشباع استفاده از رابطه‌ی دیتوس بولتر [۷۱] اصلاح شده به صورت زیر بود:

$$h_{mac} = 0.023(Re)^{0.8}(Pr)^{0.4} \left(\frac{k}{D}\right) \quad (38-2)$$

در رابطه فوق اعداد بی بعد پرانتل و رینولدز نشان دهنده‌ی مقدار اثرپذیری از سیال دوفاز هستند. برای بخش دوفازی میدان جریان معادله به صورت زیر نوشته می شود:

$$h_{mac} = 0.023(Re_l)^{0.8}(Pr)^{0.4} \left(\frac{k_l}{D}\right) F \quad (39-2)$$

که Re_l و Pr_l به ترتیب عدد پرانتل و عدد رینولدز مایع هستند. پارامتر F نیز نسبت عدد رینولدز دوفاز به عدد رینولدز بر پایه‌ی بخش مایع جریان است. سهم بخش جوش هسته‌ای نیز از تقریب فروستر و زوبر [۷۸]، که تعدیل یافته است به دست می آید.

$$h = \frac{0.00122k_l^{0.79}c_{pl}^{0.45}\rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5}\mu_l^{0.29}H_{fg}^{0.24}\rho_g^{0.24}}(T_w - T_s)^{0.24}\Delta P^{0.75}S \quad (40-2)$$

$$+ 0.023 \left[\frac{DG(1-x)}{\mu_l} \right]^{0.8} \left(\frac{c_{pl}\mu_l}{k_l} \right) \frac{k_l}{D} F$$

$$\Delta T = T_w - T_s \quad (41-2)$$

$$\Delta P = T_{sat}(T_w - P) \quad (42-2)$$

$$(\Delta T_e)^{0.99} = \left(\frac{T_e}{\lambda\rho_v} \right)^{0.75} (\Delta T_e)^{0.24}(\Delta P_e)^{0.75} \quad (43-2)$$

$$S = \left(\frac{\Delta T_e}{\Delta T}\right)^{0.24} \left(\frac{\Delta P_e}{\Delta P}\right)^{0.75} \quad (44-2)$$

سپس وی مقادیر عددی برای F و S فراهم آورد و F و S را به ترتیب بر حسب $\frac{1}{X_{tt}}$ و $Re_l F^{1.25}$ به صورت نمودار نمایش داد.

۸-۲ تقریب شاه [۷۰]

در سال ۱۹۷۶ وی یک تقریب برای جریان جوشش اشباع را بسط داد. برای این تقریب سیالات $R - 11$ ، $R - 12$ و $R - 113$ و آب پیشنهاد می شود. بازه فشار مناسب این تقریب نیز بین 15psi تا 2500psi است.

۹-۲ تقریب گانگورو و وینرتون [۶۸]

این دو محقق به تصحیح تقریب چن و توسعه‌ی آن برای جریان جوشش در لوله‌های افقی و عمودی پرداختند.

$$h_{TP} = E h_l + S h_{pool} \quad (45-2)$$

$$E = 1 + 24000 Bo^{1.16} + 1.23 \left(\frac{1}{X_{tt}}\right)^{0.86} \quad (46-2)$$

در روابط بالا X_{tt} پارامتر مارتینلی برای جریان آشفته_آشفته است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$X_{tt} = \left(1 - \frac{x_g}{x_g}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.1} \quad (47-2)$$

تقریب کوپر [۹۲] برای محاسبه h_{pool} استفاده می شود. این ترفند تفاوت اصلی این تقریب با تقریب چن است.

$$h_{pool} = 55 P_r^{0.12} (-\log P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.067} \quad (48-2)$$

۱۰-۲ تقریب بجنورگ و همکاران [۸۹]

آن‌ها تقریب آزمایشگاهی ساده‌ی زیر را معرفی کردند.

$$q = q_{FC} + q_B \left[1 - \left(\frac{(T_w - T_{sat})_{ib}}{T_w - T_{sat}} \right)^3 \right] \quad (۴۹-۲)$$

این تقریب به‌طور واضح مجموعی از اجزای جوشش و جابه‌جایی است.

$$q_{FC} = \frac{Re_l^{0.9} Pr_l F(X_{tt}) k_l}{F_2 D} (T_w - T_{sat}) \quad (۵۰-۲)$$

$$F(X_{tt}) = 0.15 \left[\frac{1}{X_{tt}} + 2 \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.32} \right] \quad (۵۱-۲)$$

$$Re_l = \frac{GD(1-x)}{\mu_l} \quad (۵۲-۲)$$

$$F_2 = 5Pr_l + 5 \ln(1 + Pr_l) \quad Re_l > 1125 \quad (۵۳-۲)$$

$$+ 2.5 \ln(0.0031 Re_l^{0.812})$$

$$F_2 = 5Pr_l + 5 \ln[1 + Pr_l(0.0964 Re_l^{0.585} - 1)] \quad 50 < Re_l < 1125 \quad (۵۴-۲)$$

$$F_2 = 0.0707 Pr_l Re_l^{0.5} \quad Re_l < 50 \quad (۵۵-۲)$$

برای جوشش مادون سرد و نواحی با کیفیت پایین آن‌ها رابطه‌ی زیر را پیشنهاد می‌کنند.

$$\left(\frac{h_{FC} D}{k_b} \right) = 0.023 \left(\frac{GD}{\mu_f} \right)^{0.8} \left(\frac{\mu_f C_{pb}}{k_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۵۶-۲)$$

$$q_{FC} = h_{FC} [(T_w - T_{sat}) + (\Delta T_{sc})] \quad (۵۷-۲)$$

خواصی که با اندیس b مشخص شده‌اند باید در دمای مایع محاسبه شوند. اندیس f نشان

دهنده‌ی محاسبه خواص در دمای فیلم است.

$$\frac{q_B}{\mu_f h_{fg}} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{B_M k_l^{\frac{1}{2}} \rho_l^{\frac{17}{8}} C_{pl}^{\frac{19}{8}} \rho_v^{\frac{1}{8}}}{\mu_l h_{fg} (\rho_l - \rho_v)^{\frac{9}{8}} \sigma^{\frac{5}{8}} T_{sat}^{\frac{1}{8}}} \Delta T_{sat}^3 \quad (58-2)$$

در رابطه ۵۸-۲، B_M یک ثابت بی‌بعد است که برای آب در سیستم SI برابر 1.89×10^{-12} است.

$$\Delta T_{sat,ib} = \frac{8\sigma T_{sat} \beta v_{fg} h_{FC}}{k_l h_{fg}} \quad (59-2)$$

۱۱-۲ تقریب کلیمنکو [۷۲ و ۷۳]

وی نیز تقریبی برای انتقال حرارت جوشش جابه‌جایی اجباری را توسعه داد. وی این تقریب را برای هر دو حالت لوله افقی و عمودی پیشنهاد داد. معادلات ۹-۲ تا ۱۸-۲ روابطی است که وی آن‌ها را به دست آورده است.

۱۲-۲ تقریب اسیتنر و تابورک [۹۰]

تقریب این دو محقق در گروه تقریب‌های در گروه مدل مجزا قرار می‌گیرد. این تقریب بر اساس اصل جمع توان و کوتاتادیز [۹۳]، است. بر این اساس اجزای جوشش هسته‌ای و جابه‌جایی هم جمع می‌شوند. پارمتر F_{nb} در روابط زیر نشان می‌دهد که کدام جز غالب‌تر است. تقریب اسیتنر و تابورک به‌صورت زیر است.

$$h_{TP} = (h_{nb}^n + h_{cb}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (60-2)$$

$$h_{nb} = h_{nbo} F_{tp} \quad (61-2)$$

$$F_{nb} = F_{tp}^m \left(\frac{q}{q_0}\right)^m \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-0.4} \left(\frac{Ra}{Ra_0}\right)^{0.133} \quad (62-2)$$

$$h_{cb} = h_{lo} F_{tp} \quad (63-2)$$

$$F_{tp} = \left[(1-x)^{1.5} + 1.9x^{0.6} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.35} \right]^{1.1} \quad (64-2)$$

۱۳-۲ تقریب تران و همکاران [۸۳]

این تقریب بر اساس داده‌های خودشان که برای یک کانال دایروی با قطر ۲,۴۶ میلی‌متر و یک کانال مستطیلی با قطر هیدرولیکی ۲,۴۰ میلی‌متر است. سیال عامل آن‌ها $R - 12$ بود.

$$h_{tp} = [8.4 \times 10^5 (Bo^2 We_{fl})^{0.3} \left(\frac{v_g}{v_f}\right)^{-0.4}] \quad (65-2)$$

$$We_{fo} = \frac{v_f G^2 D_h}{\sigma} \quad (66-2)$$

۱۴-۲ تقریب لی و موداوار [۹۴]

همان‌طور که در قبل گفته شد، این دو محقق تمام جو شش را به سه قسمت تقسیم کردند، برای هر قسمت نیز تقریب جداگانه‌ای را ارائه دادند. این محققان از دو پارامتر مارتینلی رژیم ویسکوز-ویسکوز و ویسکوز-آشفته استفاده کردند.

$$0 < x_e < 0.05 \quad h_{tp} = 3.856 X^{0.267} h_{sp,f} \quad (67-2)$$

$$h_{sp,f} = \frac{Nu^* k_f}{D_g}, \quad X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \quad (68-2)$$

$$X_{vv} = \left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)^{0.5} \left(\frac{1-x_e}{x_e}\right)^{0.5} \left(\frac{v_f}{v_g}\right)^{0.5} \quad (69-2)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{f_f Re_g^{0.25}}{0.079} \right)^{0.5} \left(\frac{1-x_e}{x_e} \right)^{0.5} \left(\frac{v_f}{v_g} \right)^{0.5} \quad (70-2)$$

$$Re_g = \frac{G x_e D_h}{\mu_g} \quad (71-2)$$

$$0.05 < x_e < 0.55 \quad h_{yp} = 436.48 Bo^{0.522} We_{fo}^{0.351} X^{0.665} h_{sp,f} \quad (72-2)$$

$$Bo = \frac{q''}{G h_{fg}} \quad (73-2)$$

$$We_{fo} = \frac{v_f G^2 D_h}{\sigma} \quad (74-2)$$

$$0.55 < x_e < 1 \quad h_{tp} = \max\{(108.6 X^{1.665} h_{sp,g}), h_{sp,g}\} \quad (75-2)$$

$$h_{sp,g} = \frac{Nu^* k_g}{D_h} \quad \text{برای جریان آرام} \quad (76-2)$$

$$h_{sp,g} = 0.023 Re_g^{0.8} Pr_g^{0.4} \quad \text{برای جریان آشفته} \quad (77-2)$$

$$Nu^* = 8.235(1 - 1.883\beta + 3.767\beta^2 - 5.814\beta^3 + 5.361\beta^4 - 2\beta^5) \quad (78-2)$$

۱۵-۲ تقریب هاینز و فلچر [۹۵]

این تقریب هم بر اساس داده‌های آزمایشگاهی برای جو شش مادون سرد و جو شش اشباع با

سیال عامل $R - 11$ و $HCFC - 123$ در یک لوله‌ی مسی به قطر ۰٫۹۲ و ۱٫۹۵ میلی‌متر است.

$$h = h_{FC} + h_{PB} \frac{\Delta T_{sat}}{\Delta T_{mean}} \quad \text{معادله ۷۵-۲}$$

فصل سوم

میکروکانالها

در این فصل به معرفی و توصیف فرآیندهای ساخت میکروکانال‌ها می‌پردازیم. در اغلب موارد هنگامی که نیاز به دفع حرارتی معادل ۱۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع است، نمی‌توان به‌آسانی از سامانه‌های هوا خنک و یا آب‌خنک استفاده کنیم. در بسیاری از کاربردها برای دفع شار حرارتی بالای المان‌ها نیاز به سینک‌های حرارتی است که اندازه‌ای معمولاً چندین برابر خود المان را دارند. با این وجود بازهم نقاط داغ معمولاً ظاهر می‌شوند. هم‌چنین شار حرارتی در برخی نقاط به‌صورت غیریکنواخت است. این امر موجب تشویق و ایجاد انگیزه برای محققان کرده است تا چاه‌های حرارتی را معرفی کنند که مستقیماً به پشت منبع حرارتی متصل شوند. این امر موجب حذف عدم یکنواختی شار حرارتی می‌شود. این سینک‌های معمولاً از جنس سیلیکون هستند و یک‌لایه‌ی اکسید سیلیکون بر روی آن‌ها برای ایجاد عایق الکتریکی وجود دارد. کانال‌های بسیار باریکی به‌صورت فین در محدوده‌ی میکرونی برای حصول اطمینان از حذف یکنواخت شار حرارتی شکل‌گرفته‌اند. در این کانال‌ها سیال خنک‌کن نیز جریان دارد.

از قانون نیوتن در مورد سرمایش می‌دانیم که برای یک اختلاف دمای ثابت، شار حرارتی وابسته به حاصل ضرب ضریب انتقال حرارت و سطح مقطع است. بنابراین برای برآورده کردن نیاز به حذف شار حرارتی، این حاصل‌ضرب باید افزایش یابد. از آنجایی که ضریب انتقال حرارت وابسته به قطر هیدرولیکی است. افزایش سطح مقطع یکی از گزینه‌ها است. سطح انتقال حرارت می‌تواند با استفاده از میکروکانال‌ها بر روی بلندی تولیدکننده گرما افزایش یابد. رفتار جریان آب داخل کانال‌ها به‌وسیله قطر هیدرولیکی کانال و سطح مقطع کانال محاسبه می‌شود. برای دستیابی به انتقال حرارت بالا، قطر هیدرولیکی کوچک‌تر و سطح انتقال حرارت بزرگ‌تری از کانال مناسب است. بنابراین یک تعداد از کانال‌های کوچک با عمق زیاد موردنیاز است. قطر هیدرولیکی کوچک‌تر و سطح مقطع بزرگ‌تر افت فشار را بیشتر می‌کند و بنابراین نیازمند قدرت پمپ بیشتری است.

۲-۳ طبقه‌بندی میکروکانال‌ها

ما می‌توانیم میکروکانال‌ها را به روش‌های متفاوتی طبقه‌بندی کنیم. برخی محققان معیارهای متفاوتی برای مینی و میکروکانال‌ها در نظر می‌گیرند. سریزاوا^۱ [۹۶] و همکارانش یک معیار را به صورت زیر تعریف می‌کنند:

در میکروکانال‌ها باید $d_h \leq b$ همواره برقرار باشد. b ثابت لاپلاس و d_h قطر هیدرولیکی کانال است. مهندال و همکارانش [۸۰]، با استفاده از قطر هیدرولیکی کانال‌ها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرده‌اند:

$$1 \text{ mm} \leq d_h \leq 6 \text{ mm} \quad \text{ماکرو کانال}$$

$$1 \mu\text{m} \leq d_h \leq 100 \mu\text{m} \quad \text{میکروکانال}$$

$$100 \mu\text{m} \leq d_h \leq 1 \mu\text{m} \quad \text{مینی کانال}$$

$$d_h \geq 6 \text{ mm} \quad \text{کانال‌های معمولی}$$

کاندلیکار [۶۶]، برای طبقه‌بندی میکروکانال‌ها شرایط زیر را پیشنهاد داد:

$$10 \mu\text{m} < d_h < 200 \mu\text{m} \quad \text{میکروکانال}$$

$$200 \mu\text{m} < d_h < 3 \mu\text{m} \quad \text{مینی کانال}$$

$$d_h > 3 \text{ mm} \quad \text{کانال‌های معمولی}$$

پالم [۸۱]، یکی تعریف کلی‌تر از میکروکانال را ارائه داد. وی میکروکانال‌ها را المان‌هایی حرارتی در نظر گرفت که تئوری‌های کلاسیک قادر به پیش‌بینی ضریب اصطکاک و انتقال حرارت در آن‌ها

^۱ Serizawa

نیستند.

۳-۳ مزایا و چالش‌های میکروکانال‌ها

جریان در میکروکانال‌ها در چند دهه‌ی اخیر به‌طور وسیعی مورد تحقیق قرار گرفته است. همان‌طور که در بالا گفته شد مزیت میکروکانال‌ها در ضریب انتقال حرارت بالا و توانایی آن‌ها در کاهش چشم‌گیر اندازه‌ی چاه‌های حرارتی و مبدل‌ها است. از دیگر مزیت‌های این نوع مبدل‌ها می‌توان به کاهش وزن، کاهش مواد مصرفی و کاهش تجهیزات اشاره کرد. کاهش قطر میکروکانال‌ها، چاه‌های حرارتی بیشتری را نتیجه می‌دهد و ضریب انتقال حرارت با توجه به افزایش سطح مقطع در واحد حجم بیشتر می‌شود. میکروکانال‌ها کاربردهای عملی وسیعی در زمینه‌های مختلف مثل مهندسی پزشکی و سیستم‌های سیالاتی، میکروپمپ‌ها، میکرولوله‌های حرارتی و غیره را دارند.

برای مثال تراکم و وزن کم میکروکانال‌ها صنعت خوردساز را قانع کرده که به جای لوله‌های دایروی از میکروکانال‌های با قطر هیدرولیکی حدود ۱ mm به‌عنوان مبدل حرارتی استفاده کنند. اخیراً میکروکانال‌ها با موفقیت در تهویه مطبوع اتومبیل‌ها، سلول‌های سوختی و ادوات میکروالکترونیک به کار گرفته شده‌اند.

چالش اصلی میکروکانال‌ها، سختی‌های ساخت و صاف کردن سیال عامل موردنیاز برای جریان یافتن در این کانال‌ها است. افت فشار بالا و قدرت پمپ بالای موردنیاز نیز از دیگر چالش‌های پی‌شرو است.

۳-۴ روش‌های ساخت میکروکانال‌ها

میکروکانال‌ها به روش‌های متنوع و گسترده‌ای ساخته می‌شوند. این روش‌ها با توجه به ابعاد و مواد مورد استفاده متفاوت خواهند بود. موادهای رایج برای میکروکانال‌ها شامل سیلیکون، سیلیکا، پلیمرها و یا فلزات هستند. پیکربندی اصلی میکروکانال‌ها به صورت مستطیلی، شبه دایروی، مثلثی و

یا ذوذنقه‌ای هستند. که به‌صورت گسترده توسط ناگوین^۱ و ورلی^۲ [۹۷]، خلاصه شده است. هندسه‌های دیگر میکروکانال‌ها ممکن است عملکرد جالب‌تری از خود نشان بدهند ولی هنوز مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند.

از زمانی که اولین میکروکانال‌ها توسط تاکرمین و پیس [۱۱] نمایش داده شد، روش‌های متنوعی برای ساخت میکروکانال‌ها^۳ استاندارد سازی شد و این روش‌ها را می‌توان به دودسته‌ی روش‌های قدیمی^۴ و روش‌های مدرن^۵ تقسیم کرد.

روش‌های سنتی شامل میکرو دگرگسی^۶، میکرو اره‌کاری^۷، میکرو فرزکاری^۸، میکرو برش‌کاری^۹ می‌شوند. روش‌های جدید ساخت شامل روش‌های سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی^{۱۰}، میکروماشین‌کاری لیزری^{۱۱}، ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی^{۱۲} و میکرو قالب‌ریزی^{۱۳} می‌شوند.

فناوری سیستم میکروالکترومکانیکی به‌طور چشم‌گیری در کنار فناوری نیمه‌هادی‌ها^{۱۴} پیشرفت داشته است. این فناوری پرکاربردترین فناوری برای تحقیقات آزمایشگاهی است. اخیراً فناوری میکروماشین‌کاری با لیزر با توجه به عدم قطعیت^{۱۵} ساخت پایین و همچنین پتانسیل آن برای ساخت تعداد نامحدودی از هندسه‌ها، کانون توجهات را به خود جلب کرده است.

^۱ Nguyen

^۲ Werely

^۳ Microfabrication

^۴ Conventional Technology

^۵ Modern Technology

^۶ Micro-deformation

^۷ Micro-sawing

^۸ Micro-milling

^۹ Dicing

^{۱۰} Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS)

^{۱۱} Laser micro machining

^{۱۲} Electro-discharge machining

^{۱۳} Micromolding

^{۱۴} Semiconductor

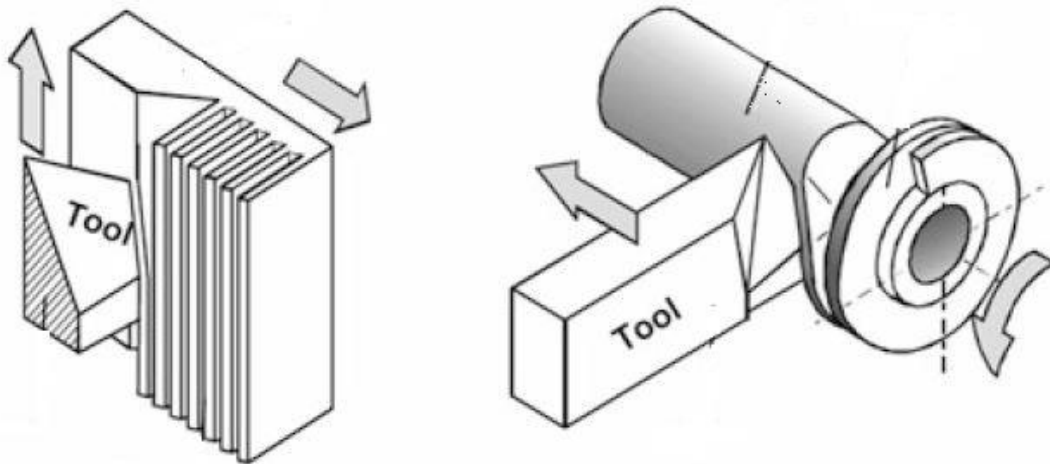
^{۱۵} Uncertainty

۳-۴-۱ روش‌های سنتی

۳-۴-۱-۱ میکرو دگرگیزی

با این روش می‌توان کانال‌هایی با سطح مقطع مستطیلی را بر روی هر ماده‌ای ایجاد کرد. همان‌طور که کاکوسکی^۱ [۹۸]، گزارش داده است با این روش می‌توان ۵۰۰ کانال در هر اینچ ایجاد کرد. امروزه تا حدود ۲۵۰ میکروکانال در هر اینچ به صورت معمول بر روی گستره‌ای از مواد شکل داد. کانال‌ها در یک گذر پیوسته و یا چند گذار، بسته به سیستم استفاده شده بریده می‌شوند. مزایای این روش عبارت‌اند از قیمت پایین و سرعت عمل.

اگرچه بسته به نرخ کرنش - سختی ماده برخی مواد پس از فرآیند نیاز به عملیات‌های ثانویه اضافی داشته باشند. در شکل ۳-۱ این فرآیند را مشاهده می‌کنیم.

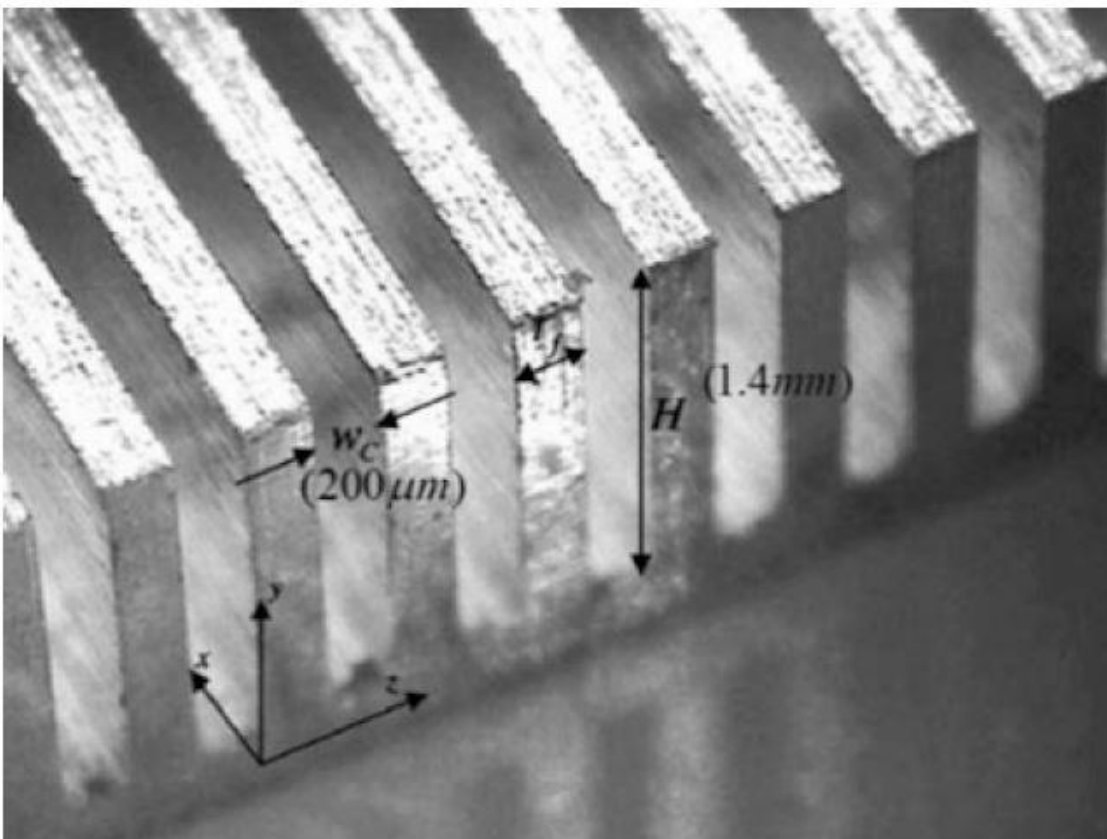


شکل ۳-۱ میکرو دگرگیزی [۹۸]

^۱ Kukowski

۳-۴-۱-۲ میکرواره کاری

این روش یک روش صنعتی است که می‌تواند کانال‌هایی مستطیلی یا سیلیکونی با عمق ۰,۱ تا ۱۰ میلی‌متر را ایجاد کند. این روش بسیار سریع بوده و کم هزینه‌ترین روش میکرو ساخت است. این روش از یک ااره ساینده برای ساخت میکروکانال‌ها استفاده می‌کند.



شکل ۳-۳ میکرواره کاری [۱۰۰]

۳-۴-۲ روش‌های مدرن

۳-۴-۱-۲ سیستم‌های میکروالکترومکانیکی

بسیاری از تحقیقات در مراکز سیستم‌های میکروالکترومکانیکی بر روی روش‌هایی است که از بخش نیمه رساناها به وجود آمده است. بسیاری از فناوری‌ها در این دسته جای می‌گیرند. روش‌های

مثل کنده کاری تر^۱، لیگا^۲، کنده کاری عمیق یون‌های فعال^۳ از جمله این روش‌ها هستند. با استفاده از این روش کانال‌هایی با سطح مقطع مستطیلی، دایروی، مثلثی و ذوزنقه‌ای را می‌توان بر روی فلز، سلیکون و شیشه ساخت. محدوده‌ی اندازه‌ی کانال‌ها در این روش از مقیاس نانومتر تا میلی‌متر است. این روش برای حوزه‌های صنعتی به‌خوبی مطالعه نشده است، چراکه زمان موردنیاز این فرآیند زیاد است.

فرآیند کنده کاری عمیق یون‌های فعال در شکل ۳-۳ آورده شده است. این روش با نشانیدن یک ماده‌ی مقاوم به نور^۴ بر روی نمونه یا استفاده از فرآیندهای لایه نشانی^۵ آغاز می‌شود. در مرحله‌ی بعد نمونه تحت نور ماورابنفش^۶ قرار می‌گیرد. کانال‌ها شکل می‌گیرند و در آخر یک پوشش بر روی سطح کانال‌ها قرار می‌گیرد و باروش‌های اتصال^۷ به آن متصل می‌شود.

^۱ Wet Etch

^۲ LIGA (Litographie, Galvanoforming, and Abforming)

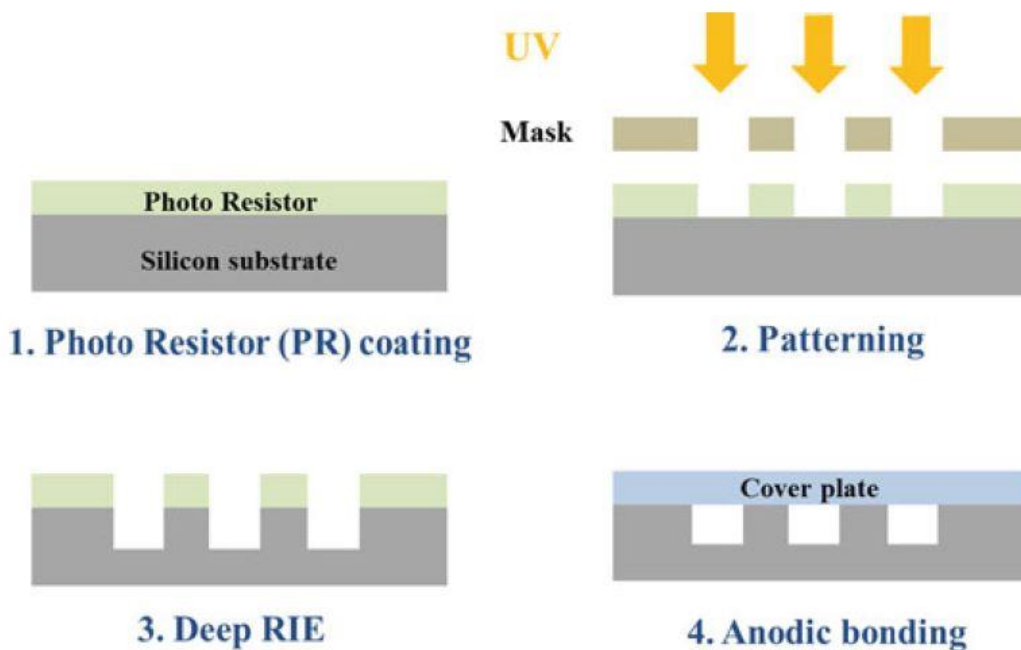
^۳ Deep Reactive Ion Etching (DRIE)

^۴ Photoresist

^۵ Deposition (Sputtering Process)

^۶ U.V.

^۷ Anodic Bonding



شکل ۳-۳ روش کنده کاری عمیق یونی. ۱- نشان دادن ماده مقاوم به نور ۲- اعمال نور ماورا بنفش ۳- تشکیل کانالها با در عرض قرار دادن بمباران یونی ۴ پوشاندن قسمت بالای کانالها [۱۰۱]

۳-۲-۴-۲ میکروماشینکاری با لیزر

این روش اخیرا برای ساخت میکروکانالها به کار می‌رود. این روش را می‌توان برای تمام مواد استفاده کرد و بازه‌ی گسترده‌ای از اندازه کانالها را شامل می‌شود. روش لیزر از لحاظ هندسه نیز محدودیتی ندارد. استفاده از لیزر از تمام جنبه‌ها از روش‌هایی که در بالا گفتیم بهتر است. اما این روش هنوز استفاده صنعتی فراگیر نشده است. باریکه‌ی لیزر پس از عبور از لنزهای متمرکز کننده به نمونه می‌رسد. این در حالیست که نمونه توسط کنترل کامپیوتری در سه راستای مختلف حرکت می‌کند و میکروکانالها را شکل می‌دهد.

برای ساخت میکروکانال‌های موردا استفاده در این ر ساله ما از روش لیتوگرافی نوری^۱ استفاده کردیم. این روش جز روش‌های مدرن برای ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی است. به همین

^۱ Photolithography

دلیل از بحث در مورد دیگر روش‌ها در این فصل خودداری می‌کنیم و فقط به شرح روش لیتوگرافی نوری می‌پردازیم.

۳-۵ الگودهی^۱ - لیتوگرافی نوری

لیتوگرافی نوری که به لیتوگرافی اپتیکی^۲ نیز شناخته می‌شود، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ساخت ساختارهای مقیاس میکرو است. بسته به نوع انرژی باریکه این روش می‌تواند به روش لیتوگرافی الکترونی^۳، لیتوگرافی اشعه ایکس^۴ و لیتوگرافی یونی^۵ تقسیم شود [۹۹].

فرآیندهای الگودهی به روش لیتوگرافی نوری محدود به ساختارهای دو بعدی جانبی می‌شوند. این روش از یک لایه حساس به نور^۶ به نام لایه مقاوم استفاده می‌کند که نمونه‌ی مطلوب ما از یک ماسک شفاف به روی نمونه منتقل می‌کند.

لیتوگرافی نوری شامل سه گام فرآیند است.

۱- فرآیند تثبیت^۷ (افزودن^۸): قرار دادن ماسک و زیرلایه^۹ به صورت افقی و تنظیم فاصله‌ی بین ماسک و زیرلایه‌ای که با ماده‌ی مقاوم پوشیده شده است.

۲- فرآیند در معرض قرار گرفتن^{۱۰}: لایه‌ی مقاوم را در معرض نور یا اشعه ایکس قرار می‌دهیم تا با توجه به تفاوت خواص نواحی مختلف الگو به لایه‌ی مقاوم به نور منتقل شود.

^۱ Patterning

^۲ Optical Lithography

^۳ Electron Lithography

^۴ X-Ray Lithography

^۵ Ion Lithography

^۶ Photosensitive

^۷ Positioning Process

^۸ Additive

^۹ Substrate

^{۱۰} Exposure Process

۳- فرآیند توسعه دادن^۱ (حذف کردن^۲): حل شدن برای لایه‌ی مقاوم منفی یا کننده‌کاری برای

لایه‌ی مقاوم مثبت از الگوی مقاوم در محلول پرداخت.

تحت تصویر الگوی منتقل شده به طول موج نوری که تابیده می‌شود و فاصله‌ی بین ماسک و

لایه‌ی مقاوم به نور بستگی دارد.

$$b = 1.5\sqrt{\lambda s} \quad (۱-۳)$$

۳-۵-۱ نگاهی اجمالی به لیتوگرافی نوری

در شکل ۳-۴ تصویر گام‌های پایه‌ای الگودهی لیتوگرافی نوری را مشاهده می‌کنیم. به ترتیب

(۱) آماده‌سازی زیرلایه، (۲) اعمال ماده مقاوم به نور، (۳) پیش‌پخت (پخت نرم)، (۴) نشان هم

ترازی^۲، (۵) در معرض نور قرار گرفتن، (۶) پرداخت و توسعه، (۷) پخت نهایی، (۸) فرآیندهای ثانویه و

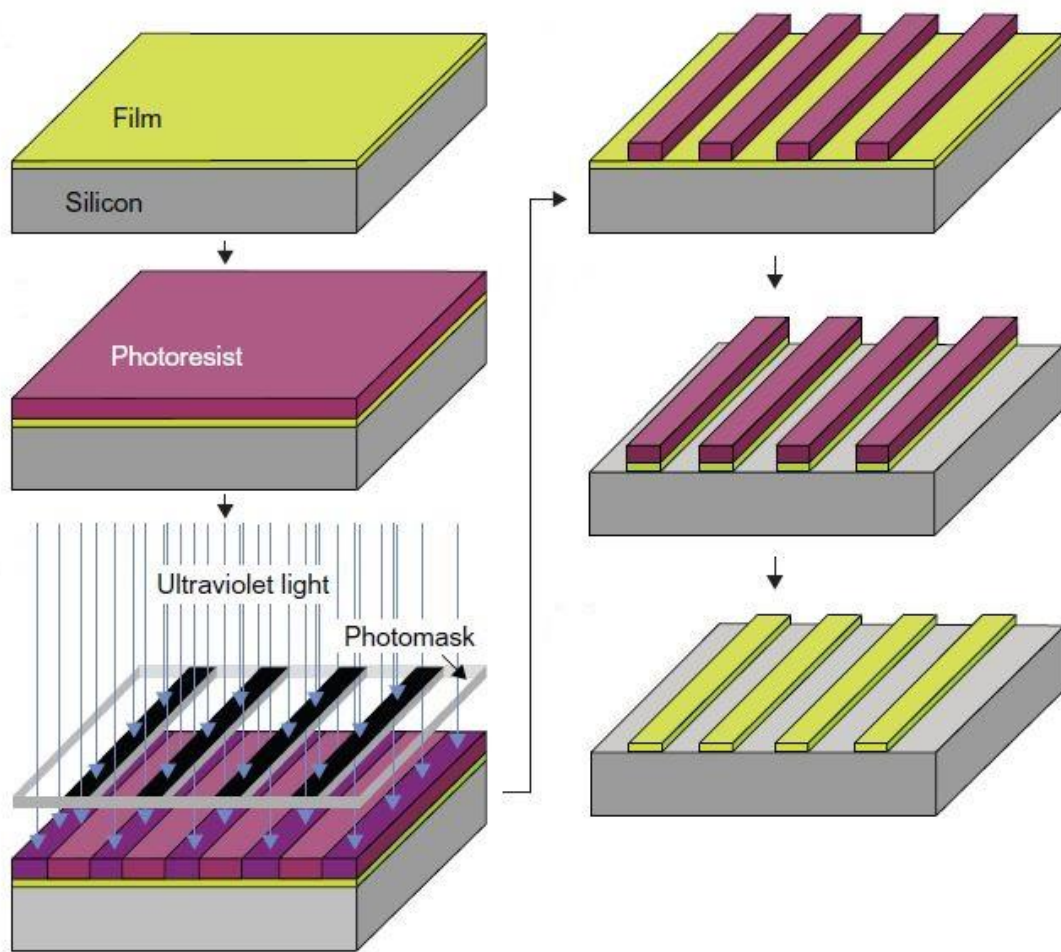
استفاده از ماده مقاوم به نور به‌عنوان یک لایه ماسک و (۹) پاکسازی^۴.

^۱ Development

^۲ Subtractive

^۳ Alignment

^۴ Stripping



شکل ۳-۴ نمایی از الگودهی به روش لیتوگرافی نوری [۱۰۲]

فرآیند با تمیز کردن دقیق سطح از مواد باقی مانده یا آلودگی‌های موجود در محیط آغاز می‌شود. سپس ماده مقاوم به نور با روش‌های لایه نشانی بر روی قرص^۱ پوشش داده می‌شود. به محض اعمال ماده مقاوم به نور این لایه به منظور حذف حلال‌ها و ارتقای چسبندگی فیلم پیش پخت می‌شود. سپس قرص پوشیده شده با ماده مقاوم به نور به وسیله‌ی هم تراز و نوردهی برده می‌شود. الگوها بر روی ماسک نوری به لایه‌ی مقاوم به نور منتقل می‌شود، و با توجه به حساسیت انتخابی به‌صورت مجانب بر روی فیلم قرار می‌گیرد. بسته به نوع ماده مقاوم به نور نواحی در معرض

^۱ Wafer

قرار گرفته می‌توانند باقی بمانند و یا در یک محلول پرداخت توسعه پیدا کنند.

۳-۵-۱-۱ تمیز کردن قرص و آماده سازی زیرلایه

پیش از انجام هرگونه فرآیندی قرص ماده نیاز به تمیز شدن دارد. آلاینده‌های معمولی شامل ذرات گرد و غبار، یون‌های فلزی و پسماندهای ارگانیک فرآیندهای پیشین هستند. نوع تمیز کردن به طبیعت ماده زیرلایه و فیلم بستگی دارد.

فرآیند استاندارد تمیز کردن سیلیکون RCA نام دارد. این فرآیند شامل $RCA - 1 (SC - 1)$ به منظور حذف آلاینده‌های ذاتی و $RCA - 2 (SC - 2)$ به منظور حذف آلاینده‌های یونی و تمیز کردن با اسید هیدروفلوریک^۱ برای حذف لایه‌ی اکسیدی محلی است.

ابتدا قرص سیلیکون با استون^۲ و ایزو پروپیل^۳، چربی‌زدایی شده و در آب دی یونیزه خیس می‌شود. مرحله‌ی دوم قرار دادن قرص در محلول $SC - 1$ در دمایی حدود ۷۵ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه است. این محلول شامل NH_4CH و H_2O_2 و H_2O با نسبت ۱ به ۱ به ۵ است. بعد از حمام آب مقطر یک غسل جزئی در محلول اسید هیدروفلوریک و آب به نسبت ۱ به ۵۰ در دمای اتاق برای حذف اکسیدهای طبیعی انجام می‌شود. مرحله‌ی آخر مستغرق کردن قرص در محلول $YSC - 2$ است، که شامل HCL ، H_2O_2 ، H_2O با نسبت ۱ به ۱ به ۶ است.

۳-۵-۱-۲ اعمال ماده مقاوم به نور

پس از فرآیند تمیزکاری قرص تحت دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای حذف رطوبت پخته می‌شود. زیرلایه سپس با یک کاتالیزور چسبنده بتونه‌کاری می‌شود. این کار برای افزایش چسبندگی ماده مقاوم به نور به زیرلایه حیاتی است. چراکه ممکن است الگوهای ریز در مرحله پرداخت ورقه ورقه

^۱ HF

^۲ Aseton

^۳ Isopropyl

باشوند.

لایه نشانی چرخشی^۱ معمول‌ترین روش برای این کار است. ضخامت این فیلم در حدود ۰,۵ تا ۲ میکرون برای مدارهای چاپی سیلیکونی و بیشتر از ۱ سانتی‌متر برای برخی ساختارهای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی گزارش شده است. هرچه قدر ضخامت فیلم نازک‌تر باشد دقت الگو بیشتر می‌شود.

بعد از لایه نشانی پخت نرم در دمایی بین ۶۰ تا ۱۲۰ سانتی‌گراد در مدت زمان ۱ تا ۱۰ دقیقه برای حذف حلال‌ها و تنش‌های پسماند انجام می‌شود.

سپس تحت تابش نور یا در معرض سیستم‌هایی قرار می‌گیرد تا تصویر از ماسک نوری به زیرلایه منتقل شود.

۳-۵-۲ ماسک‌های نوری

طراحی المان‌های میکرو یا نانو ابتدا نیاز به یک واسطه‌ی فیزیکی دارد و در لیتوگرافی این واسطه ماسک نوری است. بسیاری از نرم افزارهای کامپوتری برای طراحی الگو و تبدیل آن به نقشه‌های قابل چاپ وجود دارد. ماسک‌های نوری معمولاً از نمونه‌های کدر بر روی یک شیشه‌ی اپتیکی یا صفحات کوارتز تشکیل شده‌اند. امولسیون، کروم و اکسید آهن مواد کدر رایج هستند.

روش‌های متنوعی برای انتقال الگو از رایانه به ماسک نوری وجود دارد. ساده‌ترین و ارزان‌ترین راه، استفاده از چاپگر لیزری دفتری است. این روش برای نمونه‌های با اندازه‌ی ۱۰۰ میکرون به بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر نیاز به دقت بالاتری باشد باید از چاپگرهای موسوم به پلاتر و ورق‌های پلی استر شفاف استفاده کرد. مشخصات اندازه‌ی ماسک چاپ شده مستقیماً به دقت چاپگر وابسته

^۱ Spin Coating

است.

۳-۵-۳ ماده مقاوم به نور

این ماده نسبت به نور حساس^۱ است. این مواد شامل سه جز ترکیبی هستند. ۱- یک رزین پلیمری که یک ساختار محافظ ایجاد می کند و خواص حرارتی و مکانیکی لازم را به وجود می آورد. ۲- یک حلال رقیق که باعث می شود رزین بر روی زیرلایه تشکیل یک ضخامت بدهد ۳- یک جز فعال نوری که فاز پلیمری را با فعل و انفعالات نوری- شیمیایی تحت تاثیر قرار می دهد.

به طور کلی این ماده به دو دسته ماده مقاوم به نور مثبت^۲ و ماده مقاوم به نور منفی^۳ تقسیم می شود. در شکل ۳-۴ تفاوت این دو دسته را مشاهده می کنیم. در جدول ۳-۱ مقایسه ای بین این دو دسته را مشاهده می کنیم.

جدول ۳-۱ مقایسه ماده مقاوم مثبت و منفی [۱۰۲]

ماده مثبت	ماده منفی
مناسب برای اندازه های کوچکتر (کمتر از ۰,۵ میکرون)	مناسب برای اندازه های بزرگتر (با تلورانس ^۲ میکرون)
تمایز جلوه بالا	تمایز جلوه پایین ^۴
چسبندگی ضعیف به سیلیکون	چسبندگی خوب به سیلیکون
هزینه بالا	کم قیمت تر

^۱ PR

^۲ Positive PR

^۳ Negative PR

^۴ Contrast

حذف سخت	حذف آسان از روی زیرلایه
مقاومت عالی برای کنده کاری تر	مقاومت معمولی
توسعه دهنده آلی	توسعه دهنده آبی

۳-۶ روش های افزودن

روش های افزودن در میکروساخت به فرآیندهایی اشاره دارد که لایه‌ی نازک را بر روی زیرلایه لایه نشانی می‌کند. این لایه‌های نازک می‌توانند از جنس فلز، نیم‌رسانا یا عایق باشند. این لایه‌ها به‌عنوان ۱- اجزای الکتریکی ۲- اجزای مکانیکی ۳- اجزای کمک کننده به فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش های متعددی برای لایه نشانی لایه‌های نازک بر روی زیرلایه وجود دارد. از این روش ها می‌توان به رسوب بخار شیمیایی^۱، رسوب بخار فیزیکی^۲، آبکاری^۳، اکسیداسیون^۴، لایه‌نشانی فاز مایع^۵ و غیره اشاره کرد.

۳-۶-۱ رسوب دهی بخار شیمیایی

این روش یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ساخت فیلم مواد بر روی زیر لایه است. در این فرآیند واکنش‌های گازی به داخل محفظه واکنش وارد می‌شوند. واکنش بر روی سطح زیر لایه ی گرم شده رخ می‌دهد. در نتیجه بر روی زیر لایه‌ی یک محصول جامد لایه نشانی می‌شود. مابقی گازهای واکنشگر

^۱ Chemical Vapor Deposition (CVD)

^۲ Physical Vapor Deposition (PVD)

^۳ Electroplating

^۴ Oxidation

^۵ Liquid-phase Deposition

محفظه را ترک می کنند. بسته به شرایط واکنش فرآیند رسوب دهی بخار شیمیایی به صورت زیر دسته بندی می شود.

۱. رسوب دهی بخار شیمیایی در فشار اتمسفر^۱

۲. رسوب دهی بخار شیمیایی در فشار پایین^۲

۳. رسوب دهی بخار شیمیایی با کمک پلاسما^۳

۳-۶-۲ اکسیداسیون حرارتی

برای لایه نشانی اکسید سیلیکون بر روی قرص سیلیکون ساده ترین روش اکسیداسیون حرارتی است. در میکرو ابزارهای بر پایه سیلیکون معمولاً از این روش استفاده می کنند. بسته به نوع اکسید کننده، اکسیداسیون حرارتی به دو دسته خشک^۴ و تر^۵ تقسیم می شود.

در اکسیداسیون خشک، اکسیژن خالص با سیلیکون در دمایی بین ۸۰۰ °C تا ۱۲۰۰ °C واکنش می دهد.



و در اکسیداسیون تر بخار آب در دمای بالا با سیلیکون واکنش می دهد.



۳-۶-۳ رسوب دهی بخار فیزیکی

لایه های نازکی از مواد مختلف می توانند شکل بگیرند. در این روش مواد جامد تبخیر شده و

^۱ APCVD

^۲ LPCVD

^۳ PECVD

^۴ Dry Oxidation

^۵ Wet Oxidation

توسط گرما یا به وسیله باریکه‌های پرنرژی الکترون، فوتون و یا یون‌های مثبت به سمت زیر لایه‌ی هدف منتقل می‌شوند. این روش معمولاً برای لایه نشانی لایه‌های رسانای الکتریکی مثل فلزات یا سیلسیدها استفاده می‌شود. این فرآیند معمولاً در خلاء بالا انجام می‌شود. چرا که در خلا بالا مولکول‌ها در یک خط مستقیم حرکت می‌کنند و با قرار گرفتن هدف در خط دید، لایه نشانی می‌شود. بنابراین یکنواختی نرخ لایه نشانی معمولاً با هندسه‌ی منبع تا هدف محاسبه می‌شود. فرآیندهای رسوب‌دهی بخار فیزیکی شامل تبخیر^۱، کند و پاش^۲، ساییش لیزری^۳ و روش‌های پیوندی^۴ می‌شود. اگرچه واکنش‌های شیمیایی در فاز گازی و در زیرلایه به‌طور کلی حذف شده اما اکسیدهای ساده فلزی و نیترات‌ها با نشت اکسیژن و نیتروژن در حین فرآیند رسوب‌دهی رشد می‌کنند.

۳-۶-۴ لایه نشانی سل - ژل^۵

در این روش ذرات جامد از یک پلیمر که در یک حلال حل شده‌اند با پوشش‌دهی چرخی بر روی سطح زیر لایه پوشانده می‌شوند. این فرآیند تشکیل یک شبکه‌ی ژلاتینی بر روی سطح زیر لایه می‌دهد. پس از حذف حلال از جامد ژل، یک لایه‌ی جامد باقی خواهد ماند. با این روش سرامیک‌های مختلف مثل قاب زیر کنت-تیتانات^۶ را نیز می‌توان لایه نشانی کرد.

۳-۶-۵ پوشش دهی چرخی

آسان‌ترین راه برای ایجاد یک لایه بر روی یک زیر لایه است. این روش برای پوشش دادن ماده مقاوم برای لیتوگرافی نوری استفاده می‌شود. این روش معمولاً برای پوشش دهی پلیمرها و یا پیش ماده‌های شیمیایی یک پلیمر استفاده می‌شود. در این فرآیند یک حلال ماده را حل می‌کند و سپس بر

^۱ Evaporation

^۲ Sputtering

^۳ Laser Ablation

^۴ Hybrid methods

^۵ Sol-Gel

^۶ Lead Zirconate Titanate (PZT)

روی سطح زیر لایه که با سرعت نزدیک به ۵۰۰۰ دور بر دقیقه دوران می کند اسپری می شود. نیروی گریز از مرکز ناشی از سرعت دوران، کشش سطحی و لزجت با محاسبه ی ضخامت فیلم پوشیده شده محاسبه می شوند. بخشی از محلول در حین فرآیند چرخش تبخیر می شود و بقیه آن توسط باز پخت در دمایی حدود ۱۰۰ °C تا ۲۰۰ °C حذف می شود. پوشش حاصل تقریباً یک سطح صاف را حتی برای سطوح غیر مسطح ایجاد می کند. بنابراین از این روش برای مسطح سازی سطوح نیز می توان استفاده کرد.

۳-۶-۶ ناخالص سازی^۱

قرار دادن یون^۲ یکی از مهم ترین روش ها برای میکروالکترونیک ها است. در این روش ناخالصی هایی به نیمه رساناها مثل سیلیکون افزوده می شود. افزودن اتم هایی مثل بور با سه الکترون آزاد به سیلیکون بار مثبتی در سیلیکون ایجاد می کند که به حفره معروف است. افزودن اتم هایی مثل فسفر با پنج الکترون آزاد به سیلیکون بار منفی به نام الکترون را ایجاد می کند. به نوع حفره دار سیلیکون نوع p^۳ و به نوع الکترون دار سیلیکون نوع n^۴ گویند.

افزودن یون می تواند برای ساخت لایه های عایق مثل سیلیکون دی اکسید بر روی زیر لایه استفاده می شود. در دماهای بالا افزودن یون اکسیژن یک لایه ی اکسیژن با عمقی حدود ۰/۱ تا ۱ میکرون از سطح را ایجاد می کند.

^۱ Doping

^۲ Ion Implanatation

^۳ P-Type

^۴ N-Type

۳-۷ روش‌های کاهنده^۱

۳-۷-۱ کنده‌کاری تر

این روش بر مبنای فرآیندهای کنده‌کاری مواد جامد در محلول شیمیایی است. در حین این فرآیندها یا زیر لایه در محلول شناور می‌شود و یا محلول به روی زیر لایه افشانه می‌شود.

فرآیندهای کنده‌کاری در میکروالکترونیک‌ها اغلب به صورت همسانگرد^۲، عدم وابستگی به جهت گیری بلوره‌ای هستند.

کنده‌کاری تر همسانگرد کاستی‌هایی در طراحی ساختارهای جانبی دارد. اگر محلول کنده‌کاری به خوبی مخلوط شده باشد نمای جلویی کنده‌کاری به صورت دایروی است. در میکروکانال‌ها عرض کانال به عمق کانال وابسته است.

مزیت‌های اصلی کنده‌کاری عبارت‌اند از:

۱- بهگزینی بالا^۳

۲- سطح کنده‌کاری نسبتاً مسطح

۳- قابل تکرار پذیر بودن

۴- قابلیت کنترل فرآیند با کنترل غلظت نقش افکن^۴

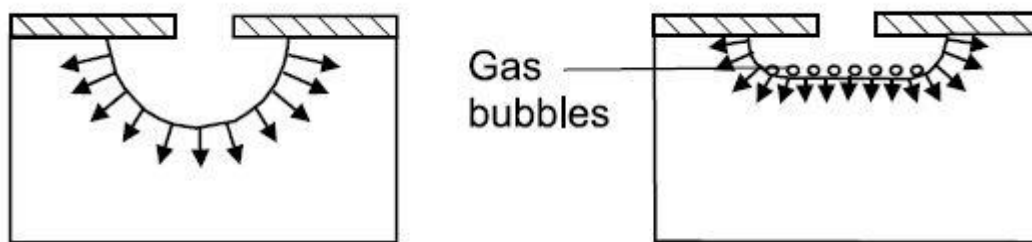
کنده‌کاری همسانگرد اغلب برای حذف لایه‌های نازک و با یک فیلم نازک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخلوط کردن مناسب محلول بر نتایج کنده‌کاری تاثیر می‌گذارد. این امر به این دلیل است که محصولات واکنش همانند یک سد بین نقش افکن و سطح ماده عمل می‌کنند.

^۱ Subtractive Techniques

^۲ Isotropic

^۳ High Selectivity

^۴ Etchant



شکل ۳-۵ مقایسه بین دو محلول نقش افکن که به خوبی (سمت راست) و به صورت نامناسب (سمت چپ) مخلوط شده است [۹۷].

در جدول ۳-۲ برخی نقش افکن ها را معرفی کرده ایم.

جدول ۳-۲ برخی نقش افکن های متداول [۹۷]

ماده	نقش افکن
<i>Si</i>	<i>HF, HNO₃, CH₃COOH, KOH</i>
<i>SiO₂</i>	<i>NH₄, HF, NHO₃, H₂O, H₃PO₄</i>
<i>Si₃N₄</i>	<i>H₃PO₄</i>
<i>Al</i>	<i>H₃PO₄, HNO₃</i>

نخستین نقش افکن برای زیر لایه‌ی اکسید فلزی یا شیشه اسید هیدروفلوریک است. این نقش

افکن رایج ترین برای ساخت تراشه‌های میکروسیال شیشه‌ای^۱ است.



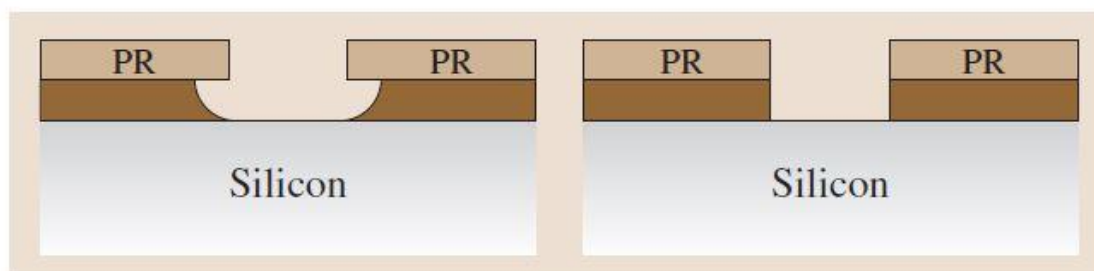
در دمای بالا دی‌اکسید سیلیکون در یک آلکالی غلیظ حل می‌شود.

^۱ Glass Microfluidic Chips



کنده کاری همسانگرد سیلیکون با یک مخلوط از اسید نیتریک، اسید هیدروفلوریک و اسید استیک اتفاق می افتد.

در شکل ۶-۳ تفاوت بین کنده کاری همسانگرد و ناهمسانگرد را مشاهده می کنیم.



شکل ۶-۳ تفاوت بین کنده کاری همسانگرد و ناهمسانگرد [۱۰۳]

با توجه به اینکه در پژوهش حاضر با روش کنده کاری تر ناهمسانگرد به ساخت میکروکانالها پرداخته ایم، این روش در فصل آینده به تفصیل بیان می شود.

۲-۷-۳ کنده کاری خشک

کنده کاری خشک^۱ از بخار و یا پلاسما برای حذف مواد استفاده می کند. این روش بر پایه ی یکی از مکانیزمهای زیر است:

۱. کنده کاری فیزیکی^۲ (حرارتی یا پاششی)
۲. کنده کاری واکنشی^۳ (واکنش شیمیایی)
۳. تفکیک نوری^۴ (انرژی فوتون باعث شکستگی پیوندها می شود)

^۱ Dry Etching

^۲ Physical Etch

^۳ Reactive etching

^۴ Photodissociation

خیلی از روش‌های کنده‌کاری خشک منجر به کنده‌کاری همسانگرد می‌شود.

کنده‌کاری فیزیکی از باریکه‌های یونی، الکترونی یا فوتونی برای بمباران سطح ماده استفاده می‌کند. انرژی سینتکی یون‌ها اتم‌ها را از سطح زیر لایه جدا می‌کند. باریکه‌ی پر انرژی سپس باعث تبخیر مواد جدا شده می‌شود. اغلب مواد را با این روش می‌توان کنده‌کاری کرد.

معایب این روش عبارت‌اند از:

۱. نرخ کنده‌کاری پایین
۲. به‌گزینی پایین (چرا که یون‌ها به تمام مواد حمله می‌کند)
۳. اثرات محیطی جدا کننده^۱ به دلیل یون‌های بازتاب شده
۴. کنده‌کاری شیمیایی با استفاده از واکنش شیمیایی بین نقش افکن‌های گازی سطح ماده را مورد حمله قرار می‌دهند.

محصولات گازی شرایط لازم برای کنده‌کاری شیمیایی خشک هستند چرا که لایه نشانی محصولات واکنش فرآیند کنده‌کاری را متوقف می‌سازد. کنده‌کاری شیمیایی خشک یک فرآیند همسانگرد است. این فرآیند می‌تواند برای تمیز کردن قرص‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

^۱ Trench Effects

فصل چهارم

روند انجام آزمایش و نتایج

۴-۱ نمای کلی

در این فصل ابتدا به شرح و تفصیل ساخت میکروکانال می‌پردازیم. سپس روند آماده‌سازی نمونه آزمایشگاه که شامل قرارگیری حس‌گرهای دما، روند تغییرات شار حرارتی، تغییرات دبی جریان و داده‌برداری را شرح می‌دهیم. و نتایج حاصل را در پایان بیان خواهیم کرد.

۴-۲ روند ساخت میکروکانال

مواد متفاوتی برای ساخت میکروکانال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مواد شامل ساختارهای مختلف سیلیکون مثل سیلیکون تک بلوره‌ای، سیلیکون رشد یافته، پلی سیلیکون، دی‌اکسید سیلیکون، شیشه و پلیمرهای گوناگون مثل پلی دی متیل سیلوگزان^۱ و $SU - 8$ فلزات هستند. با توجه به کاربردی که در این پژوهش از میکروکانال انتظار داریم، محدوده‌ی مواد برای استفاده چاه‌های حرارتی محدود است.

سه ماده‌ی رایج برای چاه‌های حرارتی عبارتند از مس، آلومینیم و سیلیکون. در جدول ۴-۱ خواص حرارتی این سه ماده را مشاهده می‌کنیم.

ضریب هدایت حرارتی $\frac{w}{mK}$	ماده
۴۰۱	مس
۲۳۷	آلومینیم
۱۴۸	سیلیکون
۴۰	آلومینا ^۲

^۱ Polydimethyl Siloxane (PDMS)

^۲ Al_2O_3

هر یک از این سه ماده مزایا و معایب خاص خود را دارند. مس با اینکه بیشترین ضریب هدایت حرارتی را داراست، ولی زمانی که بخواهیم از مایع به عنوان سیال عامل استفاده کنیم برای آب‌بندی^۱ با مشکلاتی مواجه خواهیم شد. از دیگر معایب مس می‌توان به رسانای الکتریکی بودن آن اشاره کرد. همچنین محدود بودن و پیچیدگی ساخت میکروکانال بر روی مس از دیگر عواملی است که می‌توان برای عدم استفاده از مس اشاره نمود.

۴-۲-۱ سیلیکون

در پژوهش حاضر سیلیکون به عنوان ماده سازنده میکروکانال انتخاب شد. خواص مکانیکی و حرارتی سیلیکون را در جدول ۴-۲ مشاهده می‌شود.

جدول ۴-۱ خواص مکانیکی سیلیکون [۱۰۴]

$9.8 \times 10^{11} \frac{dyn}{cm^2}$		مدول الاستیسیته
$2.329 \frac{g}{cm^2}$		چگالی
129.5 GPa	[100]	مدول یانگ
168 GPa	[110]	
186.5 GPa	[111]	
64.1 GPa		مدول برشی
0.22 to 0.28		نسبت پواسون

^۱ Sealing

جدول ۲-۴ خواص حرارتی سیلیکون [۱۰۴]

1414 °C	نقطه ذوب
2628 K	نقطه جوشش
$0.7 \frac{J}{g \text{ } ^\circ C}$	ظرفیت حرارتی ویژه
$148 \frac{W}{mK}$	هدایت حرارتی در دمای 300K
$0.8 \frac{cm^2}{s}$	نفوذ حرارتی
$383.3 \frac{Kj}{mol}$	گرمای تبخیر

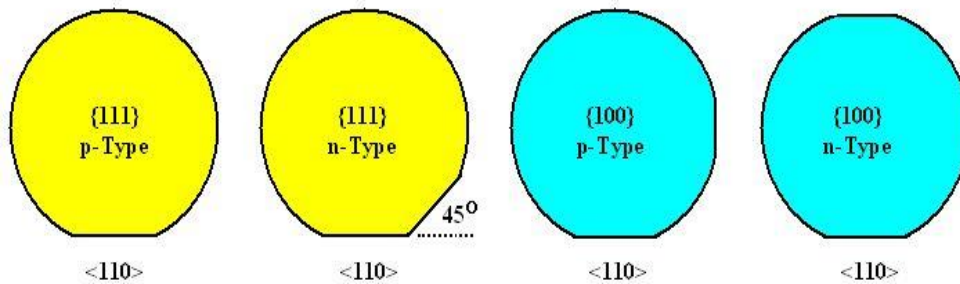
از کاربردهای سیلیکون می‌توان به عنوان اتصال نوع p یا n در سلول‌های خورشیدی و ماده‌ی پایه برای مدارهای الکتریکی اشاره کرد. همان‌طور که می‌دانیم هم در سلول‌های خورشیدی فوتوولتایی^۱ و هم در مدارات الکترونیکی حذف شار حرارتی برای افزایش بازده و طول عمر بسیار مهم است. از طرفی کم کردن فضای اشغالی توسط این تجهیزات و کاهش وزن آن‌ها در چند دهه‌ی اخیر از دغدغه‌های پژوهشگران بوده است. بنابراین معرفی چاه حرارتی‌ای که هم فضای کمتر و هم وزن کمتری داشته باشد کمکی بزرگ برای حل این چالش‌ها است.

از طرفی روش‌های متنوعی برای ساخت میکروکانال‌ها با الگوها و هندسه‌های متفاوت وجود دارد

^۱ Photovoltaic Solar Cell

همچنین هزینه‌ی آن نیز از کم است.

با توجه به این موضوع ماده سازنده میکروکانال حاضر در این پژوهش از جنس سیلیکون است. قرص‌های سیلیکونی^۱ تک کریستال با توجه به جهت‌گیری صفحاتشان تقسیم بندی می‌شوند. در واقع طبقه‌بندی براساس اندیس میلر^۲ است. در شکل ۴-۱ این طبقه‌بندی را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴-۱ جهت‌گیری سیلیکون تک کریستال

یک جهت‌گیری خاص در شبکه بلوره‌ای توسط قرار گیری داخل کرشه توصیف می‌شود. به دلیل وجود تقارن تعدادی بیش از یک جهت‌گیری خاص وجود دارد. یک دسته از این جهت‌گیری‌های خاص هم جهت را داخل کرشه زاویه دار نشان می‌دهند. اگر این جهت بردار عمود بر یک صفحه باشد، این صفحه با پرانتز نشان داده می‌شوند. و یک مجموعه از صفحات معادل را داخل آکولاد نشان می‌دهند.

قرص سیلیکونی اغلب به روش زوفرالسکی^۳ ساخته می‌شوند. یک دانه‌ی بلوره‌ای کوچک با جهت مشخص در داخل مذاب سیلیکون با خلوص بالا چکانده می‌شود. دانه به آرامی و در حالیکه بوته‌ی شامل مذاب در حال چرخش است از مذاب خارج می‌شود. کریستال‌های سیلیکون در اطراف جهت انتخاب شده رشد می‌کنند. روش دیگر ساخت کریستال‌های سیلیکون روش ناحیه معلق^۴ است. این روش سیلیکون خالص‌تری را تولید میکند. این روش مناسب نیست چرا که به دست آوردن غلظت مناسب

^۱ Silicon Wafer

^۲ Miller Indices

^۳ Czocharalski method (CZ-Method)

^۴ Floating Zone Method (FZ-Method)

۱. نقش افکن‌های هیدروکسید قلیایی: پتاسیم هیدروکسید^۱، سدیم هیدروکسید^۲، سدیم هیدروکسید...

۲. نقش افکن‌های هیدروکسید آمونیوم^۳: آمونیوم هیدروکسید، تترا متیل آمونیوم هیدروکسید^۴

۳. هیدروزین^۵ (یک ماده‌ی به شدت سمی که به عنوان سوخت موشک استفاده می‌شود)

۴. آمین گالات^۶

به دلیل ساختار بلوره‌ای، اتم‌های سیلیکون در صفحات {۱۱۱} نیروی پیوندی قوی‌تری دارند. این پیوند قوی باعث می‌شود که الکترون‌ها به سختی از این صفحات جدا شوند. بنابراین نرخ کنده‌کاری خیلی کمتر خواهد بود. در جدول ۳-۴ مشخصات نقش افکن‌ها را می‌بینیم.

جدول ۳-۴ مشخصات نقش افکن‌های مختلف در کنده‌کاری تر ناهمسانگرد [۹۷]

<i>Amine Gallate</i>	<i>Hydrazine</i>	<i>TMAH</i>	<i>NH₄OH</i>	<i>KOH</i>	مشخصه
-	-	-۱۰ ۴۰	۱۸-۱	-۴۰ ۵۰	غلظت
۱۱۸	۱۰۰	۹۰	۹۰-۷۵	۸۰	دمای کاری
۳۴-۱۷	۲	۶۰-۲۰	-	-۲/۵ ۵	نرخ کنده‌کاری در جهت $\{111\} \left(\frac{nm}{min}\right)$
۲/۳-۱/۷	۲	-۰/۵ ۱/۵	۰/۵-۰/۱	۲-۱	نرخ کنده‌کاری در جهت $\{100\} \left(\frac{nm}{min}\right)$

^۱ KOH

^۲ NaOH

^۳ Ammonium Hydroxide

^۴ TMAH

^۵ Hydrazine

^۶ Amine Gallate

-	-	۰/۱	-	۳- ۱/۵	نرخ کنده کاری در جهت $\{110\}$ $\left(\frac{nm}{min}\right)$
---	---	-----	---	--------	--

جدول فوق مهم ترین پارامترهای رایج محلول های نقش افکن را مقایسه می کند.

۳-۲-۴ نرخ کنده کاری

کنترل کردن توقف کنده کاری یکی از مهم ترین روش ها برای دقیق کردن ساخت با کنده کاری تر ناهمسانگرد است. روش های مختلف برای کاهش یا حذف فرآیند کنده کاری عبارتند از:

۱. استفاده از نقش افکن های انتخابی، پوشش دهی سطوح سیلیکون با یک لایه ی محافظ مثل

نیترات یا اکسید

۲. استفاده از نرخ های کنده کاری وابسته به جهت گیری

۳. کنترل کردن تولید حفره

روش ابتدایی اغلب برای کنده کاری انتخابی با کمک یک لایه ی دی اکسید سیلیکون و سیلیکون نیترات به عنوان ماسک مورد استفاده قرار می گیرد. با ترکیب لایه های متعدد سیلیکون/ نیترات ساختارهایی با عمق های متفاوت را می توان به وجود آورد. این لایه ی غیرفعال برای محافظت دیواره های تحت کنده کاری مورد استفاده قرار گیرد.

از آنجایی که نرخ کنده کاری برای صفحات $\{111\}$ ۲ مرتبه از صفحات $\{110\}$ و $\{100\}$ کمتر است کنده کاری در صفحه $\{111\}$ متوقف می شود.

برای فرآیند کنده کاری ۴ الکترون از هر اتم سیلیکون مورد نیاز است. آزاد شدن الکترون ها باعث ایجاد حفره می شود که باعث جذب یون های بیشتری از هیدروکسیدها در سطح زیر لایه و در نتیجه افزایش فرآیند کنده کاری می شود.

دو راه برای کنترل دسترس پذیری حفره ها وجود دارد. اول استفاده از سیلیکون نوع p با نشانند

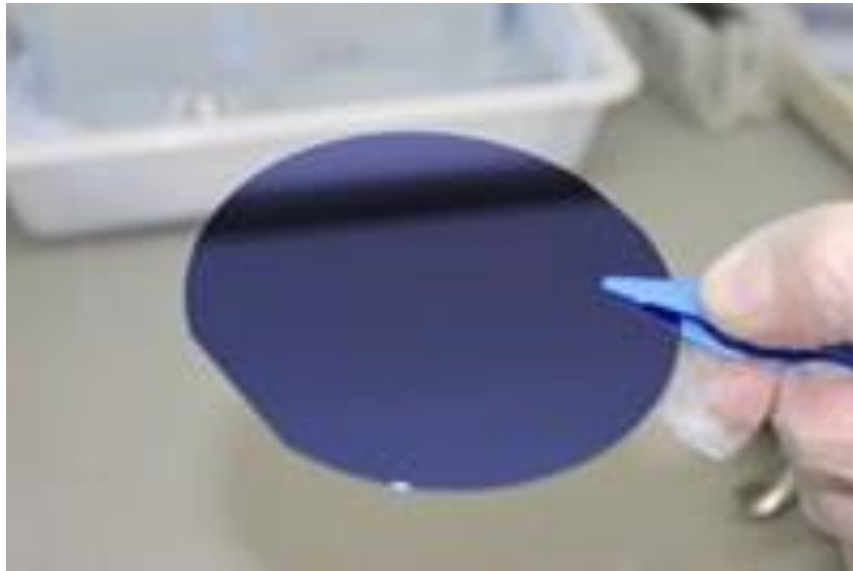
بور و دوم استفاده از کنده کاری الکتروشیمیایی با یک اتصال $p - n$.

فرآیند نشانیدن با استفاده از یک منبع جامد یا گازی بور انجام می‌شود.

در پژوهش حاضر روند ساخت میکروکانال سیلیکونی به شرح زیر است.

نوع سیلیکون مورد استفاده سیلیکون نوع n با ناخالصی فسفر است. چراکه فرآیند کنده کاری در

آن راحت تر است. برای ایجاد یک کانال مستطیلی باید از سیلیکونی با جهت‌گیری $\langle 110 \rangle$ استفاده کنیم.

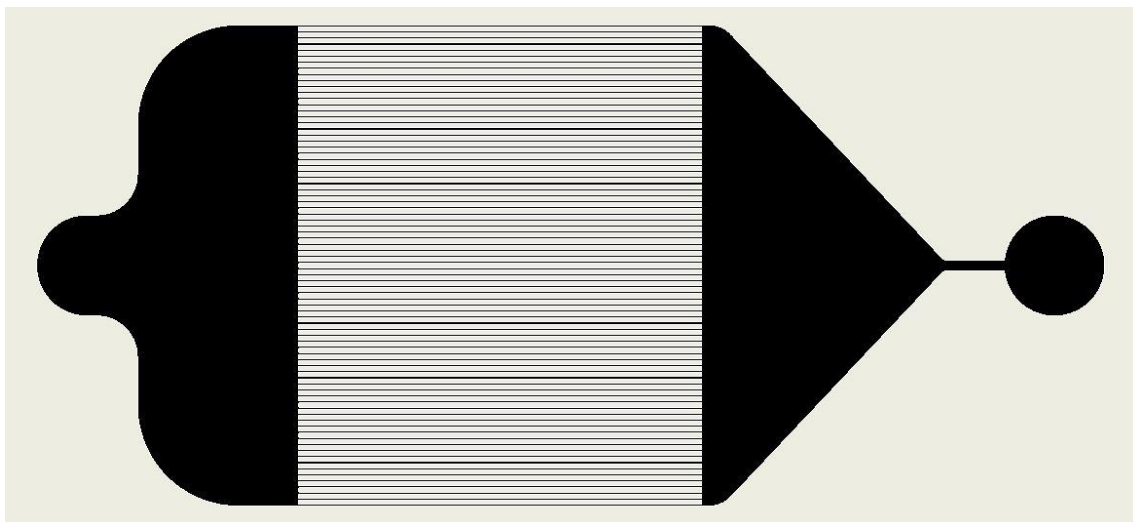


شکل ۴-۲ قرص سیلیکونی

تعداد ۸۰ میکروکانال مستطیلی شکل با عمق ۵۰ میکرون و عرض ۱۰۰ میکرون در طول ۲

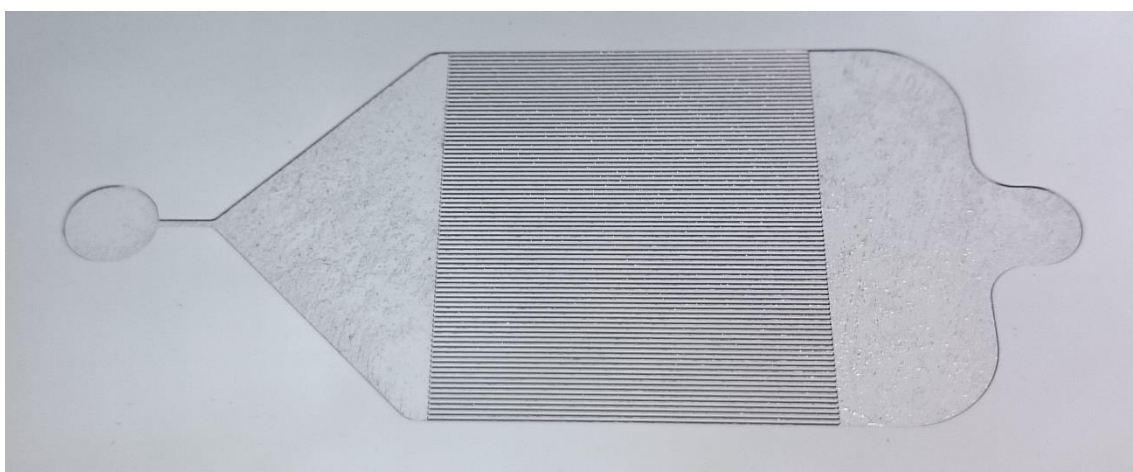
سانتی‌متر را برای این پژوهش در نظر گرفتیم. در شکل ۴-۳ تصویر کلی این میکروکانال‌ها را مشاهده

می‌کنیم. که با استفاده از همین تصویر به‌عنوان ماسک فرآیند کنده کاری، فرآیند را پیش بردیم.



شکل ۳-۴ الگوی اولیه ماسک

همان طور که در شکل مشاهده می‌کنیم ورودی میکروکانال سمت راست قرار دارد. سیال پس از ورود از یک کانال به عرض تقریباً ۱ میلی‌متر عبور کرده و وارد ناحیه‌ی ورودی می‌شود. دلیل اینکه این هندسه برای ناحیه ورودی انتخاب شده است این است که مطمئن شویم سیال به تمام کانال‌ها وارد می‌شود. همچنین وجود کانالی در ابتدا و بعد از حوضچه به منظور آرام کردن جریان و جلوگیری از جریان آشفته است. همان طور که در طرح مشاهده می‌کنیم سعی شده از وجود نواحی نوک‌تیز پرهیز شود. این کار به جلوگیری از ایجاد جریان گردابه‌ای کمک می‌کند.



شکل ۴-۴ میکروکانال کنده‌کاری شده بر روی قرص سیلیکونی



شکل ۴-۵ تصویر میکروسکوپ نوری از میکروکانال‌ها (نواحی تاریک عمق میکروکانال را نشان می‌دهد)

سپس از چاپ الگوی موردنظر به ایجاد یک لایه‌ی مقاوم بودیم. بهترین لایه برای قرص‌های سیلیکونی لایه‌ی اکسید سیلیکون است. برای لایه نشانی اکسید سیلیکونی دو راه پیش رو داشتیم. اول اینکه با لایه نشانی چرخشی ضخامت مشخصی از اکسید سیلیکون را روی زیر لایه بنشانیم و دوم راه اکسید کردن خود قرص سیلیکون زیر لایه است. به دلیل چسبندگی نامناسب روش اول مجبور به استفاده روش دوم شدیم.

برای اینکه خود زیر لایه سیلیکون اکسید شود نیز دو فرآیند متفاوت وجود دارد. یک روش استفاده از بخار آب و عبور آن از روی زیر لایه‌ی گرم شده در کوره است. این روش با توجه به عدم وجود امکانات در کشور غیرقابل استفاده بود. بنابراین از روش دوم که عبور اکسیژن از روی زیر لایه داخل کوره را انتخاب کردیم. برای این فرآیند نیاز بود تا اکسیژن را از روی زیر لایه که داخل کوره‌ی لوله‌ای در دمای حدود 1200°C تا 1400°C قرار دارد عبور دهیم. نرخ جریان اکسیژن نیز در این فرآیند در

حدود ۶۰ تا ۷۰^۱ sccm بود. نتیجه این فرآیند تشکیل یک لایه‌ی ۱۰۰ نانومتری بر روی زیر لایه بود.

سپس الگوی موردنظر را بر روی ماده مقاوم به نور چاپ کردیم. زیر لایه‌ی سیلیکونی که الگو

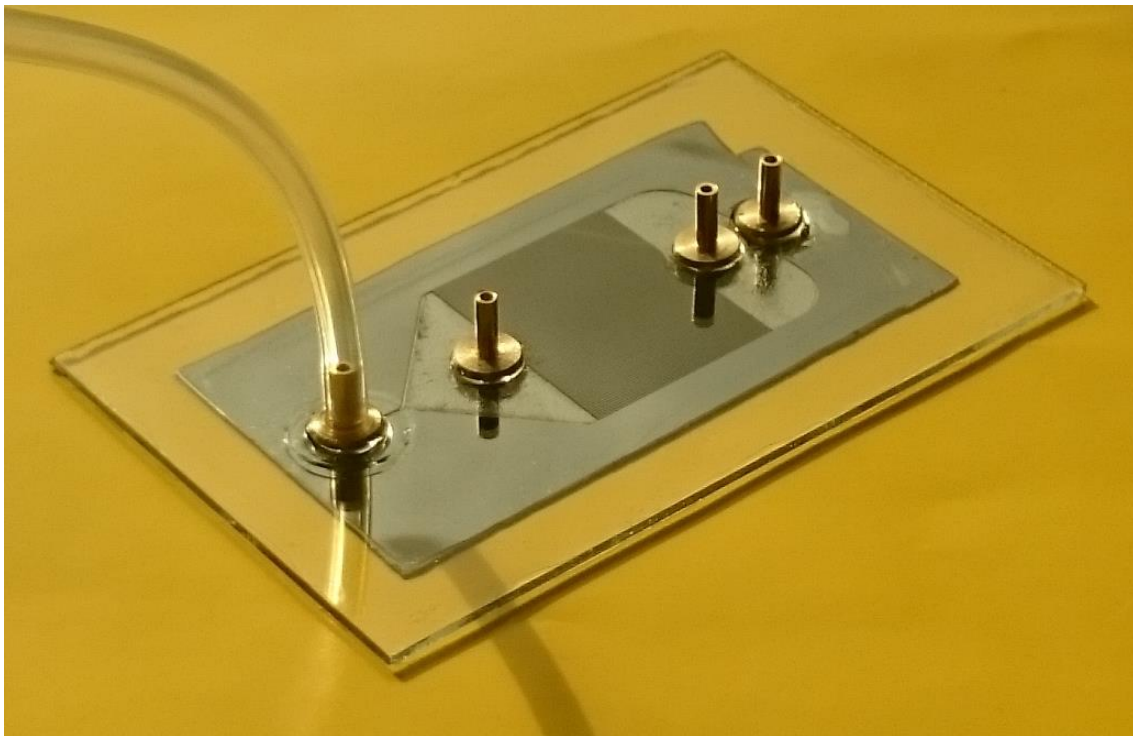
روی آن چاپ شده بود را در داخل کوره در دمای ۳۰۰^{°C} الی ۴۰۰^{°C} برای مدت ۱ ساعت قرار دادیم تا به خوبی اتصالی بین زیر لایه و ماده مقاوم ایجاد شود.

برای کنده کاری از محلول‌های هیدروکسید پتاسیم و اسید هیدروفلوریک استفاده کردیم. در پایان

پس از ایجاد الگوی موردنظر به مرحله‌ی بسته‌بندی رسیدیم. روش‌های متفاوتی برای پوشاندن

میکروکانال‌ها وجود دارد. ما با استفاده از یک پلیمر چسبنده و قرار دادن شیشه کوارتز^۲ بر روی آن

میکروکانال‌ها را پوشاندیم. در شکل ۴-۶ میکروکانال نهایی را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴-۶ طرح نهایی میکروکانال

برای بررسی تغییرات دمایی سطح میکروکانال‌ها از حس‌گرهای دمایی 100 - Pt استفاده

^۱ Standard Cubic Centimeter per Minutes

^۲ Quartz

کردیم. در شکل ۴-۷ یک نمونه از حس گر $Pt - 100$ را مشاهده می کنیم. این سانسورها بازه‌ی دمایی 200°C تا 200°C را پوشش می دهند. همان طور که در شکل مشاهده می کنیم این حس گرها دو پایه دارند. اصول کاری این حس گرها بر اساس جریان است. به طوری که با تغییرات گرمایی که حس می کنند جریان متفاوتی ایجاد می کنند. بنابراین امکان اینکه گرمای اتلافی در سیم‌ها نیز بر تغییرات دما تأثیر بگذارد نیز وجود دارد. برای جلوگیری از این امر ما به جای دو سیم به پایه‌های حس گر متصل کنیم چهار سیم متصل کردیم.



شکل ۴-۷ حس گر دمایی $Pt - 100$ استفاده شده برای اندازه‌گیری دمای سطح خارجی میکروکانال برای داده‌برداری در پژوهش حاضر با استفاده از یک اکتساب داده^۱ شرکت ادم^۲ به مدل $ADAM 4015$ و برای انتقال داده‌ها به رایانه از مبدل همین شرکت به مدل $ADAM 4561$ استفاده شده است.

^۱ Data Acquisition

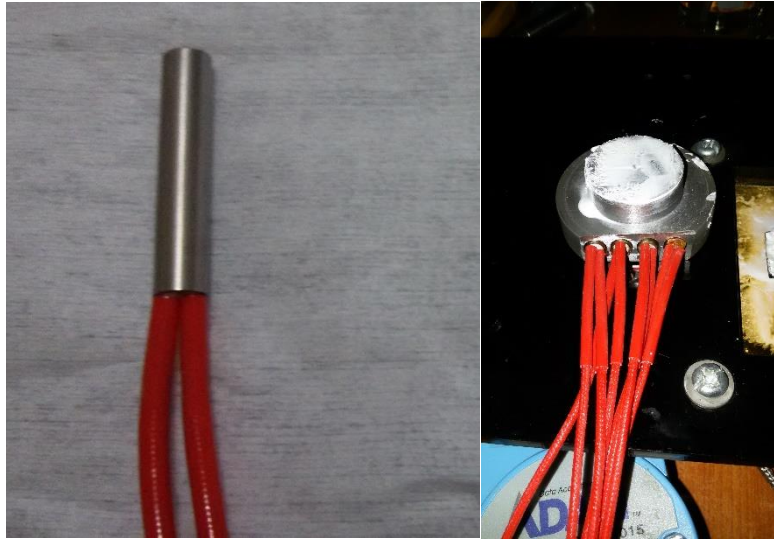
^۲ Adam



شکل ۴-۸ اکتساب داده و مبدل آن

برای گرم‌کن از قرار دادن چهار عدد المنت فشنگی^۱ ۱۵۰ وات داخل یک قطعه آلومینیومی مطابق شکل ۴-۹ استفاده شده‌است. برای تغییر دادن شار حرارتی از یک دیمر ۲۰۰۰ وات استفاده شده‌است. اساس کار دیمر تغییر ولتاژ خروجی در جریان ثابت است. با اندازه‌گیری ولتاژ و حاصل ضرب آن در جریان، شار حرارتی را نیز اندازه‌گیری می‌شود.

^۱ Cartridge Heaters



شکل ۴-۹ نمونه المنت فشنگی استفاده شده برای آزمایش

برای برقرار کردن جریان از یک میکرو پمپ شرکت تاتهیل^۱ که هم به صورت AC و هم به صورت DC کار می کند، استفاده شده است. کوپلینگ این میکرو پمپها به صورت مغناطیسی است. بنابراین مدت زمانی را برای رسیدن به حالت پایا نیاز دارند. برای کنترل جریان از یک شیر سوزنی^۲ در مسیر خروجی میکرو پمپ به ورودی میکروکانال استفاده شده است. همچنین از شلنگ های سیلیکونی شرکت لانگر^۳ با اندازه های ۱۳ و ۱۴ برای انتقال سیال استفاده شده است.

^۱ Tuthill

^۲ Needle Valve

^۳ Longer



شکل ۴-۱۰ میکرو پمپ و شیر سوزنی استفاده شده در آزمایش

در تمام طول فرآیند با استفاده از حمام آب سرد دمای ورودی ثابت و برابر 20°C قرار داشت. دمای محیط و دمای ورودی نیز در طول فرآیند اندازه گیری شده است. در شکل ۴-۱۱ نمایی کلی از تمام قسمت های دستگاه آزمایش را مشاهده می شود.



شکل ۴-۱۱ تصویر کلی دستگاه آزمایش

۳-۴ داده برداری

گرمای جذب شده توسط سیال با یک موازنه انرژی به دست می آید:

$$q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (۴-۴)$$

در رابطه فوق \dot{m} دبی جرمی، c_p گرمای ویژه و T_{out}, T_{in} به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال هستند.

شار حرارتی که از طریق سطح مقطع میکروکانال به صورت هدایت منتقل می شود از رابطه ۴-۵ به دست می آید. (چون کل میکروکانال ضخامت ناچیزی دارد از انتقال حرارت از سطوح جانبی چشم پوشی شده است).

$$q_{cond} = \frac{q}{A_{con}} \quad (۵-۴)$$

در رابطه بالا A_{cond} سطح مقطع کل میکروکانال است. برای میکروکانال های این پژوهش سطح مقطع

به صورت 2.5×2 سانتی متر مربع است.

از آنجایی که حس گرهای دمای دیواره دقیقاً در فصل مشترک دیواره و سیال قرار ندارند، دمای سطح میکروکانال، T_{wall} از رابطه ۴-۶ محاسبه می شود.

$$T_{wall} = T_{avg, Pt-100} - \frac{q''_{cond} \delta}{K_{Si}} \quad (۴-۶)$$

$T_{avg, Pt-100}$ دمایی است که حس گرهای دمایی نشان می دهند و δ فاصله کف میکروکانال تا حس گرهای دمایی است. با توجه به این که از قرص سیلیکونی به ضخامت ۳۰۰ میکرون استفاده کردیم و بر روی آن میکروکانالهایی با عمق ۱۰۰ میکرون ایجاد کردیم این فاصله برابر ۲۰۰ میکرون است. گرمای منتقل شده در واحد سطح، بر اثر جابجایی سیال که آن را بانام گرمای مؤثر می شناسیم از رابطه ۴-۷ محاسبه می شود.

$$q''_{eff} = \frac{q}{A_t} \quad (۴-۷)$$

در معادله ۴-۷ مساحتی است که انتقال حرارت با سیال اتفاق می افتد. برخلاف A_{cond} که برای تمام هندسه های مختلف میکروکانالها یکسان است، A_t متفاوت است. این مساحت برابر با مجموع دیوارها و مناطق مؤثر از کناره های دیوارها است. برای محاسبه ی این مساحت میکروکانال را به عنوان یک سطح گسترش یافته^۱ در نظر می گیریم [۱۰۹]. بنابراین مساحت مورد نظر از رابطه ۴-۸ محاسبه می شود.

$$A_t = L(W_{thick} + 2\eta H_{channel})N_{channel} \quad (۴-۸)$$

W_{thick} ضخامت دیواره های بین میکروکانالها است. η بازده سطح گسترش یافته است. با توجه به فرض آقای موداوار [۱۱۰] بالای چاه حرارتی با توجه به پوشش پلیمری عایق در نظر گرفت شده است.

^۱ Fin

از روابط کتب انتقال حرارت اینکروپرا [۱۰۸] داریم:

$$\eta = \frac{\tanh(mH_{channel})}{mH_{channel}} \quad (9-4)$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_{fluid}}{k_{Si}W_{thick}}} \quad (10-4)$$

خواص سیال همگی در دمای فیلم سیال به دست آمده است.

ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز با توجه به قانون سرمایش نیوتن برابر است با:

$$h = \frac{q''_{eff}}{T_{wall} - T_{fluid}} \quad (11-4)$$

عدد ناسلت از رابطه‌ی ۱۲-۴ به دست می‌آید.

$$Nu = \frac{hD_H}{K_f} \quad (12-4)$$

برای محاسبه‌ی رینولدز ابتدا از رابطه ۱۳-۴ سرعت متوسط را به دست می‌آوریم.

$$u = \frac{\dot{Q}}{N_{channel}W_{channel}H_{channel}} \quad (13-4)$$

و در نهایت از رابطه ۱۴-۴ مقدار رینولدز را محاسبه می‌کنیم:

$$Re = \frac{\rho \dot{Q} D_H}{\mu} \quad (14-4)$$

در این پژوهش مشخصات میکروکانال به صورت جدول ۴-۴ است:

جدول ۴-۴ مشخصات میکروکانال

قرص سیلیکون با جهت گیری <۱۱۰>	جنس میکروکانال
۱۰۰ میکرون	عمق کانالها
۱۰۰ میکرون	عرض کانالها
۲ سانتی متر	طول میکروکانالها
۱۰۰ میکرون	فاصله هر کانال با کانال بعدی

قطر هیدرولیکی این میکروکانالها با توجه به رابطه ۴-۱۲ به دست می آید.

$$D_H = \frac{4A}{p} = \frac{4H_{channel} \times W_{channel}}{2(H_{channel} + W_{channel})} \quad (۴-۱۲)$$

با توجه به رابطه فوق قطر هیدرولیکی برابر با $100 \mu m$ است.

در این پژوهش به دلایل زیر تنها قادر به مشاهده و بررسی ضریب انتقال حرارت جابجایی در ۶ دبی متفاوت ۰/۹، ۲، ۲/۳، ۳، ۳/۵ و ۳/۸ گرم بر ثانیه و تنها یک شار حرارتی $41/378 \frac{kW}{m^2}$ بودیم.

اولین دلیل برای محدوده کمی دبیها نشت آب از نواحی پین ورودی و پین خروجی برای دبیهای بالا و برای دبیهای کمتر فشار زیاد بر روی شیر سوزنی در جریان پایین دست بود.

شار حرارتی بیشتر نیز قابل اعمال نبود. به دلیل افزایش ناگهانی شار حرارتی و مناسب نبودن عایقها ابتدا به حسگرهای دمایی آسیب وارد شد. با توجه به عدم پاسخگویی مناسب حسگرها و افزایش دما این شار منجر به شکسته شدن میکروکانالها شد. در شکل ۴-۱۲ تصویر میکروکانالهای شکسته شده را مشاهده می کنید.



شکل ۴-۱۲ میکروکانال شکسته شده در اثر حرارت بالا

به منظور افزایش دقت آزمایش‌ها هر بار داده‌برداری سه مرتبه تکرار شد. نتایج حاصل نیز به صورت بازه‌ی اطمینان^۱ ۹۵٪ گزارش شده است. همچنین آنالیز عدم قطعیت با توجه به روش مافیت [۱۱۱] است. جدول ۴-۵ نشان‌گر دقت اندازه‌گیری‌ها است.

جدول ۴-۵ دقت و بازه تغییرات وسایل اندازه‌گیری

وسایل	بازه تغییرات	دقت
حس گر دما	-۲۰۰ تا +۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	± 100 درجه سانتی‌گراد
دبی سنج	۰ تا ۵ میلی‌لیتر بر ثانیه	± 0.1 میلی‌لیتر بر ثانیه
میکروسکوپ الکترونی	-	۰/۰۵ میکرومتر

^۱ Confidence Interval

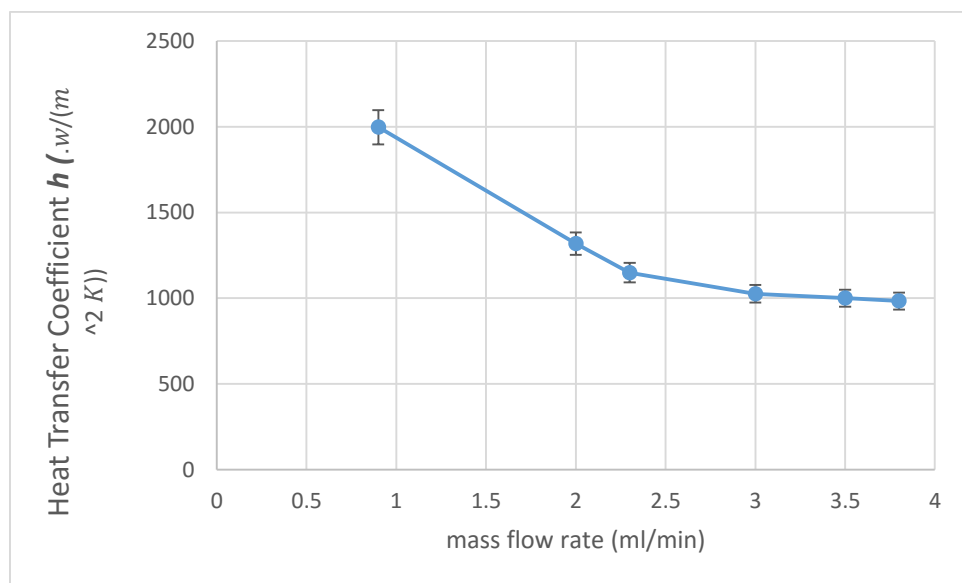
۴-۴ نتایج

پس از محاسبات مراحل قبل نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی با تغییر دبی را در

شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌کنیم.

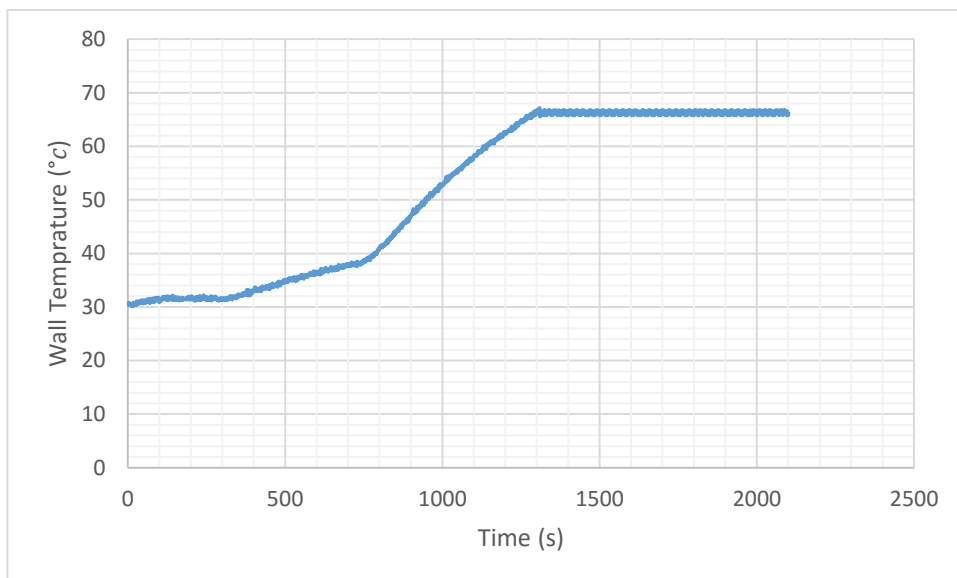
در نمودار همان‌طور که مشاهده می‌کنیم با افزایش نرخ جریان ضریب انتقال حرارت کاهش

پیدا می‌کند



شکل ۴-۱۳ تغییرات ضریب انتقال حرارت با تغییر دبی

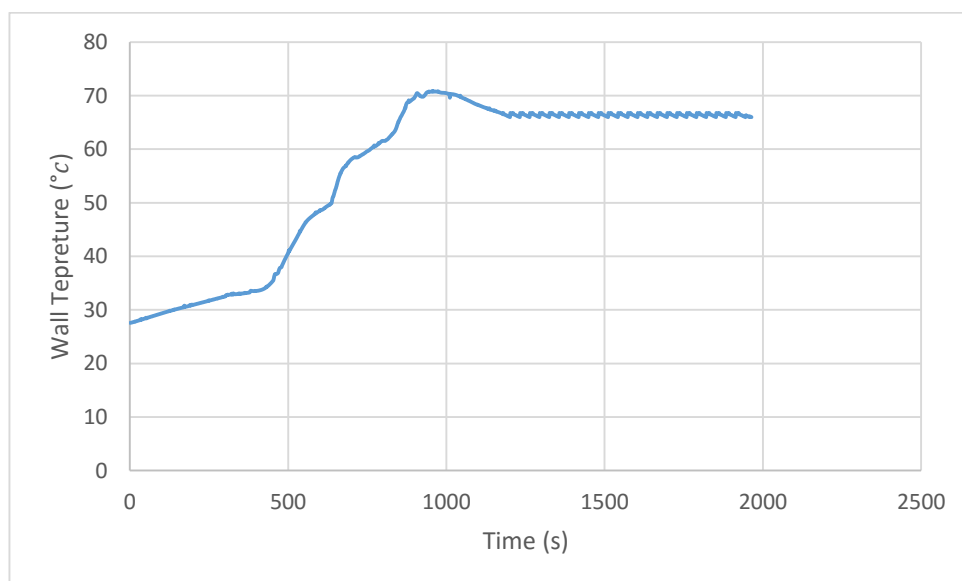
همچنین برای تغییرات دمای دیواره در بازه زمان داریم:



شکل ۴-۱۴ تغییرات دمای دیواره در بازه زمان برای دبی ۲/۳ میلی لیتر

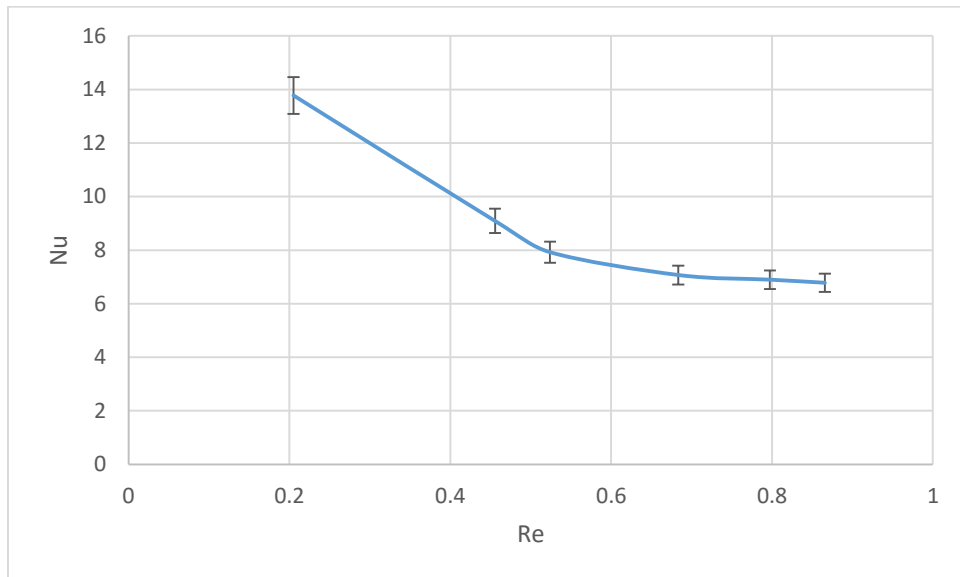
فرآیند آزمایش همان گونه که مشاهده می کنید بعد از حدود ۲۰ دقیقه به حالت پایا می رسد و ما آزمایش را تا حدود ۳۵ دقیقه ادامه دادیم. نمودار فوق برای دبی ۲/۳ میلی لیتر بر ثانیه است و برای دبی های دیگر نیز به همین صورت آزمایش را تا حدود ۳۵ دقیقه ادامه دادیم.

برای دبی ۰/۹ میلی لیتر نیز دمای دیواره به صورت شکل ۴-۱۵ است.



شکل ۴-۱۵ تغییرات دمای دیواره در بازه زمان برای دبی ۰/۹ میلی لیتر

تغییرات عدد ناسلت با نرخ جریان نیز با افزایش عدد رینولدز کاهش می یابد. همان طور که مشاهده می کنیم عدد رینولدز بسیار پایین است و همواره جریان آرام را در آزمایش خواهیم داشت.



شکل ۴-۱۶ تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز

۵-۴ پیشنهادها

با توجه به محدوده وسیع انتقال حرارت جابجایی پژوهش حاضر را می‌توان با تغییرات متعددی تکرار نمود. اما با در نظر گرفتن رویکرد این آزمایش که برای خنک کاری بود، پیشنهادها زیر برای ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود:

۱- با توجه به اینکه در جریان آشفته انتقال حرارت بهتر صورت می‌گیرد و ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتر است، با تغییر نحوه آب‌بندی و ایجاد جریان آشفته به بررسی انتقال حرارت پرداخته شود.

۲- بررسی رفتار هیدرودینامیکی سیال در میکروکانال‌ها نیز از دیگر مباحث جالب در این زمینه است.

۳- آنالیز تصویری انتقال حرارت جوشش در میکروکانال‌ها با بررسی دینامیک حباب‌ها.

۴- با بهینه‌سازی دستگاه موجود نیز می‌توان تغییرات ضریب انتقال حرارت را با تغییر شار حرارتی نیز بررسی کرد.

۵- بررسی عددی انتقال حرارت در میکروکانال‌ها برای جریان جوشش و جابجایی اجباری.

۶- بررسی عددی رفتار هیدرودینامیکی سیال در میکروکانال‌ها.

مراجع:

- [¹] S.K. Saha, G.P. Celata, “*Critical Heat Flux in Flow Boiling in Microchannels*”, Springer International Publishing Switzerland 2015
- [²] I. Mudawar (2011), “*Two-phase microchannel heat sink theory, application and limitations*”, J. Electron Package 133(4):041002
- [³] Ali R (2010),” *Phase change phenomena during fluid flow in micro channels*”, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm
- [⁴] Pop E, Goodson KE (2006),”*Thermal phenomena in nanoscale transistors*”, J Electron Package 128:102–108
- [⁵] Phillips RJ (1988),”*Microchannel heat sinks*”, MIT Lincoln Lab J 1:31–47
- [⁶] Lee J, Mudawar I (2008),”*Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two phase micro-channel heat sinks—part 1: experimental methods and flow visualization results*”, Int J Heat Mass Transfer 51:4315–4326
- [⁷] Boyd RD (1985),”*Subcooled flow boiling critical heat flux and its application to fusion energy components—part 1: a review of fundamentals of CHF and related data base*”, Fusion Technology 7:7–30
- [⁸] Lee J, Mudawar I (2009),”*Low-temperature two-phase microchannel cooling for high heat flux thermal management of defense electronics*”, IEEE Trans Compon Packag Technol 32:453–465
- [⁹] Kandlikar SG (2005),”*High flux heat removal with microchannels—a roadmap of challenges and opportunities*”, Heat Transf Eng 26:5–14
- [¹⁰] Ioan Mihai,” *Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*”, InTech 2011
- [¹¹] Tuckerman DB, Pease RFW (1981),”*High-performance heat sinking for VLSI*”, IEEE Electron Device Lett 2(198):126–129
- [¹²] W. M. Kays and A. L. London, “*Compact Heat Exchangers, 2nd ed*”, McGraw-Hill, 1964
- [¹³] G. Wallis and D. I. Pomerantz, “*Field-Assisted Glass-Metal Sealing*”, J. Appl. Phys., vol. 40, no. 10, Oct. 1969, pp. 3946-3949
- [¹⁴] Phillips RJ (1988),”*Microchannel heat sinks*”, MIT Lincoln Lab J 1:31–47
- [¹⁵] J. N. Walpole D. Begley, M. Ettenberg, C. Roychoudhuri, D. Scifres, and W. W. Simmons (1988),”*Two-Dimensional Laser Array Technology Comparison: Stack-and-Rack versus Monolithic*”, Proceedings of the SPIE 1988, Vol. 893, pp. 131-134
- [¹⁶] M. B. BOWERS and I. MUDAWAR (1993),” *High flux boiling in low flow rate, low pressure drop mini-channel and micro-channel heat sinks*” Int. J, Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 2, pp. 321-332
- [¹⁷] M. B. BOWERS and I. MUDAWAR (1994), “*Two-Phase Electronic Cooling Using Mini-Channel and Micro-Channel Heat Sinks Part 2—Flow Rate and Pressure Drop Constraints*” Transactions of the ASME, Vol. 116, pp. 290-297

[١٨] C. Perret, Ch. Schaeffer, J.Boussey (1998), “*Microchannel Integrated Heat Sinks in Silicon Technology*” Industry Applications Conference

[١٩] K.A. Triplett, S.M. Ghiaasiaan , S.I. Abdel-Khalik, D.L. Sadowski (1999), “*Gas–liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns*” ,International Journal of Multiphase Flow, Volume 25, Issue 3, pp. 377–394

[٢٠] Linan Jiang, Man Wong, and Yitshak Zohar (1999), “*Phase change in microchannel heat sinks with integrated temperature sensors*” , Microelectromechanical Systems, Vol. 3, pp. 358 – 365

[٢١] SS Mehendafe and AM Jacob, Pr Shah (2000), “*Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales With Application to Heat Exchanger Design*” , Applied Mechanics Reviews, Volume 53, Issue 7, pp.175-193

[٢٢] Tong W, Bergles AE, and Jensen MK (1997), “*Pressure drop with highly subcooled flow boiling in small-diameter tubes*” ,Exp Thermal Fluid Sci, Vol.15, pp. 202-212

[٢٣] Yang C and Webb RL (1996), “*Condensation of R-12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro-fins*” ,Int J Heat Mass Transfer, Vol. 39, pp. 791-800

[٢٤] Satish G. Kandlikar (2002), “*Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels*” , Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 26, Issues 2–4, pp. 389–407

[٢٥] Weilin Qu, Issam Mudawar (2002), “*Experimental and numerical study of pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink*” , International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, Issue 12, pp. 2549–2565

[٢٦] A. Kawahara, P.M.-Y. Chung , M. Kawaji, Akimi Serizawa , Ziping Feng, Zensaku Kawara (2002) , “*Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel*” ,International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, Issue 9, pp.1411–1435

[٢٧] Satish G. Kandlikar (2002), “*Two-phase flow patterns, pressure drop, and heat transfer during boiling in Minichannels flow passages of compact evaporators*” , Heat Transfer Engineering, Vol 23, Issue 1, pp. 5-23

[٢٨] Weilin Qu, Issam Mudawar (2003), “*Flow boiling heat transfer in two-phase micro-channel heat sinks—I. Experimental investigation and assessment of correlation methods*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, Issue 15, pp. 2755–2771

[٢٩] Weilin Qu, Issam Mudawar (2003), “*Measurement and prediction of pressure drop in two-phase micro-channel heat sinks*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, Issue 15, pp. 2737–2753

[٣٠] Joh R. Thome (2003), “*Boiling in microchannels: a review of experiment and theory*” ,International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, Issue 2, pp. 128–139

[٣١] Satish G. Kandlikar (2004), “*Heat transfer mechanisms during flow boiling in*

microchannels” , ASME 2003 1st International Conference on Microchannels and Minichannel, pp 33-46

[୩୪] Reiyu Chein, Guanming Huang (2005), “*Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluid*” ,Applied Thermal Engineering, Vol. 25, Issues 17–18, pp. 3104–3114

[୩୫] Jaeseon Lee, Issam Mudawar (2005), “*Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part I—pressure drop characteristics*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, Issue 5, pp. 928–940

[୩୬] Cheol Huh, Moo Hwan Kim (2006), “*An experimental investigation of flow boiling in an asymmetrically heated rectangular microchannel*” ,Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 30, Issue 8, pp. 775–784

[୩୭] John R. Thome (2006), “*State-of-the-art overview of boiling and two-phase flows in microchannels*” , Heat Transfer Engineering, Vol 27, Issue 9, pp. 4-19

[୩୮] Jaeseon Lee, Issam Mudawar (2007), “*Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, Issues 3–4, pp. 452–463

[୩୯] Reiyu Chein, Jason Chuang (2007), “*Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids*” ,International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, Issue 1, pp. 57–66

[୪୦] B Agostini, M Fabbri, JE Park, Bruno Michel, L Wojtan, and John R. Thome (2007), “*State of the Art of High Heat Flux Cooling Technologies*” ,Heat Transfer Engineering, Vol 28, Issue 4, pp. 258-281

[୪୧] P.S. Lee, and J.C. Ho (2002), “*Experimental Study on Laminar Heat Transfer in Microchannel Heat Sink*” ,Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp.379-386

[୪୨] R.H.W. Pijnenburg, R. Dekker, C.C.S. Nicole, A. Aubry, E.H.E.C Eummelen (2004), “*Integrate Microchannel Cooling in Silicon*” ,Solid State Device Research Conf., pp. 129-132

[୪୩] Colgan, Furman, Gayanes, Graham, LaBianca, N. Magerlein, J.H. Polastre (2004), “*A Practical Implantation of Silicon Microchannel Coolers for High Power Chips*” ,IEEE Semi-Therm Symposium, pp. 1-7

[୪୪] R.S. Prasher, Chang, I. Sauciuc (2005), “*Nano and Micro Technology-Based Next-Generation Package-Level Cooling Solutions*” ,Intel technology Journal, Vol. 9, No. 4, pp.285-296

[୪୫] Y.Q. Xie, J.Z. Yu, and Z.H. Zhao (2005), “*Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer for the Ethanol-Water Solution and FC-72 in Rectangular Microchannels*” ,Heat and Mass Transfer, Vol. 41, pp. 695-702

[୪୬] H.Y. Zhang (2005), “*Single-Phase Liquid Cooled Microchannel Heat Sink for*

Electronics Package” ,Applied Thermal Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 1472-1487

[٤٥] B. Agostini, B. Watel (2003), “*Boiling Heat Transfer in Minichannels: Influence of the Hydraulic Diameter*” ,International Congress of Refrigeration

[٤٦] B. Agostini, Bontemps (2005), “*Vertical Flow Boiling of Refrigerant R134 in Small Channels*” ,International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 26, pp. 296-306

[٤٧] B. Sumith, F. Kaminaga, K. Matsumura (2003), “*Saturated Flow Boiling of Water in a Vertical Small Diameter Tube*” ,Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 27, pp. 789-801

[٤٨] Tannaz Harirchian and Suresh V. Garimella (2008), “*Flow Boiling in Silicon Microchannel Heat Sinks*” , IEEE SEMI-THERM Symposium

[٤٩] Bruno Agostini, John Richard Thome, Matteo Fabbri, and Bruno Michel (2008), “*High Heat Flux Two-Phase Cooling in Silicon Multichannels*” ,IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 31, NO. 3, pp. 691-701

[٥٠] Poh-Seng Lee, Suresh V. Garimella (2008), “*Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, Issues 3–4, pp. 789–806

[٥١] Elnaz Kermani, Serguei Dessiatoun, Amir Shooshtari (2009) ,”*Experimental Investigation of Heat Transfer Performance of a Manifold Microchannel Heat Sink for Cooling of Concentrated Solar Cells*” ,Electronic Components and Technology Conference, pp. 453-459

[٥٢] Saeid Vafaei, Dongsheng Wen (2011), “*Flow boiling heat transfer of alumina nanofluids in single microchannels and the roles of nanoparticles*” , Journal of Nanoparticle Research March 2011, Vol. 13, Issue 3, pp 1063-1073

[٥٣] Tannaz Harirchian, Suresh V. Garimella (2011) ,” *Flow regime-based modeling of heat transfer and pressure drop in microchannel flow boiling*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, Issue 4, pp. 1246–1260

[٥٤] Tailian Chen, Suresh V. Garimella (2011) ,” *Local Heat Transfer Distribution and Effect of Instabilities During Flow Boiling in a Silicon Microchannel Heat Sink*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, Issues 15–16, pp. 3179–3190

[٥٥] Devin Pellicone, Alfonso Ortega, Marcelo del Valle, Steven Schon (2011) ,”*Simulation of Two-Phase Flow and Heat Transfer in Mini- and Micro-Channels for Concentrating Photovoltaics Cooling*” ,ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, pp1957-1967

[٥٦] Pawan K. Singh, P.V. Harikrishna, T. Sundararajan, Sarit K. Das (2012) ,”*Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels*” ,Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 42, pp. 174–186

[٥٧] Cristiano Bigonha Tibirica, Gherhardt Ribatski (2013) ,”*Flow boiling in micro-scale channels-Synthesized literature review*” ,International Journal of Refrigeration, Vol. 36, Issue 2, pp. 301–324

[٥٨] Nicolas Lamaison Fanghao Yang a, Xianming Dai, Yoav Peles, Ping Cheng, Jamil Khan, Chen Li (2014) ,” *Flow boiling phenomena in a single annular flow regime in microchannels (II): Reduced pressure drop and enhanced critical heat flux*” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 68, pp. 716–724

[٥٩] Weihuan Zhao, David M. France, Wenhua Yu, Dileep Singh (2014) ,”*Subcooled boiling heat transfer for cooling of power electronics in hybrid electric vehicles*” , Journal of Electronic Packaging

[٦٠] Keyur Thakkar, Krishna Kumar, Harshit Trivedi (2014) ,”*Thermal & Hydraulic Characteristics of Single phase flow in Mini-channel for Electronic cooling*” ,International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 3, Issue 2, pp.9726-9733

[٦١] Sambhaji T. Kadam, Ritunesh Kumar (2014) ,”*Twenty first century cooling solution Microchannel heat sinks*” ,International Journal of Thermal Sciences, Vol. 85, pp. 73–92

[٦٢] P. Chandra Sekhar, M. Raja Roy (2015) ,”*Experimentation and Analysis of Liquid Cooling System for Electronics Cooling*” ,International Journal of Engineering and Management Research, Vol. 5, Issue 3, pp. 17-23

[٦٣] Mounir BOUDOUEH, Mohamed SI AMEUR and Hasna LOUAHLIA-GUALOUS (2015) ,”*Experimental investigation of convective boiling in mini-channels Cooling application of the PEM fuel cells*” , Thermal Science, Issue 00, Pages: 24-24

[٦٤] J.G. Collier and J.R. Thome (1996) ,”*Convective Boiling and Condensation*” , third ed., Oxford University Press, Inc.

[٦٥] L.S. Tong, Y.S. Tang (1997) ,”*Boiling Heat transfer and two phase flow*”

[٦٦] Satish G. Kandlikar, Srinivas Garimella, Ste´phane Colin (2014) ,”*Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*” , Elsevier Ltd

[٦٧] S. Mostafa Ghiaasiaan (2008) ,” *Two-Phase Flow, Boiling and Condensation IN CONVENTIONAL AND MINIATURE SYSTEMS*” ,CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS

[٦٨] K.E. Gungor, R.H.S Winterton (1987) ,”*Simplified general Correlation for saturated flow Boiling and comparisons of correlations with data*” ,Chem. Eng. Res Des, Vol. 65

[٦٩] J.C. Chen (1966) ,”*Correlation for Boiling heat Transfer to Saturated fluids in convective Flow*” ,I & EC Process Design and Development vol. 5 no 3

[٧٠] M.M. Shah (1977) ,”*A General Correlation for Heat Transfer During Subcooled Boiling in Pipes and Annuli*” ,ASHRAE Trans., 83, pp. 202–215

[٧١] Dittus, F.W., Boelter, L.M.K (1930) ,”*Heat Transfer in automobile radiators of tubular type*” ,University of California Pub. Eng., Vol. 2, pp.443-461

[٧٢] V.V. Klimenko (1988) ,”A generalized correlation for two phase forced flow heat transfer” ,International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 31, Issue 3, pp. 541-552

[٧٣] V.V. Klimenko (1990) ,”A generalized correlation for two phase flow heat transfer” ,Int. J. Heat and Mass Trans ,Vol. 33, pp. 2073-2088

[٧٤] Satish G. Kandlikar (1990) ,”A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes” ,ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 219-228

[٧٥] Satish G. Kandlikar (1991) ,”Development of a flow boiling map for subcooled and saturated flow boiling of different fluids inside circular tubes” ,ASME Journal of Heat transfer, Vol. 113, pp. 190-200

[٧٦] V. Gnielinski (1970) ,”New equations for heat and Mass transfer in turbulent pipe and Channel flow” ,International Chemical Energy, Vol. 16, pp. 359-368

[٧٧] B.S. Petukov (1970) ,”Heat Transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical Propertie” ,Adv Heat Transfer, Vol. 6, pp. 503-565

[٧٨] H.K. Forster and N. Zuber (1955) ,”Bubble dynamics and boiling in heat transfer” ,AIChE J., Vol. 1, pp. 532-535

[٧٩] M. Suo, and P. Griffith (1964) ,”Two-phase flow in capillary tubes” ,J. Basic Eng, Vol. 86, pp. 576-582

[٨٠] S.S. Mehendale, A. M. Jacobi (2000) ,”Evaporative heat transfer in mesoscale heat exchanger” ,ASHRAE trans, Vol. 106, pp. 446-452

[٨١] B. Palm (2000) ,”Proceedings of Heat Transfer and Transport Phenomena in Microchannel” ,Begell House Inc., pp. 54-56

[٨٢] C. Vlassie, H. Macchi, J. Guilpart, B. Agostini (2002) ,”Flow boiling in small diameter Channels” ,Int. J. of Refrigeration, Vol. 27, pp. 191-201

[٨٣] T.N. Tran, M.W. Wambsganss, D.M. France (1996) ,”Small Circular and rectangular-channel boiling with two refrigerants” ,Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, pp. 485-498

[٨٤] S.Lin, P.A. Kew, K. Cornwell (1998) ,”Two phase flow regimes and heat transfer in small tubes and channels” ,Heat Transfer 1998 Proceedings of 11PthP IHTC, vol.2, pp. 23-28

[٨٥] B. Agostini, B. Watel, A. Bontemps, B. Thonon (2000) ,” Friction factor and heat transfer coefficient of R134a liquid flow in mini-channels” , Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp. 1821-1834

[٨٦] J. Lee, I Mudawar (2004) ,”Two phase flow in high-heat micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part II- heat transfer characteristics” ,Int. Journal of Heat and Mass Transfer

[٨٧] Liu and Winterton (1991) ,”A general correlation for saturated and subcooled

flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation” ,Int. J. Heat Mass transfer, vol. 34, no 11, p. 2759-2766

[^{٨٨}] S.G. Kandlikar (1998) ,” *Heat Transfer Characteristics in Partial Boiling, Fully Developed Boiling, and Significant Void Flow Regions of Subcooled Flow Boiling*” ,Journal of Heat Transfer, Vol. 120, p. 395

[^{٨٩}] R.W. Bjorge, G.R. Hall, W.M. Rohsenow (1982) ,”*Correlations of forced convective boiling heat transfer data*” ,Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 25, pp. 753-757

[^{٩٠}] D. Steiner and J. Taborek, (1992) ,”*Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by asymptotic model*” ,Heat Transfer Eng., Vol. 13, pp. 43-69

[^{٩١}] V. Dupont, J.R. Thome, A.M. Jacobi (2004) ,”*Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part II: Comparison with the database*” ,International Journal of Mass and Heat Transfer, Vol. 47, pp. 3387-3401

[^{٩٢}] M.G. Cooper (1984),”*Saturated Nucleate pool boiling- a simple correlation*” ,1st UK National Heat Transfer Conf. IchemE Symp, Series no 86, vol 2, pp. 785-793

[^{٩٣}] S. S. Kutateladze (1961) ,”*Boiling Heat transfer*” ,Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 4, pp.31-45

[^{٩٤}] J. Lee, I Mudawar (2004) ,”*Two phase flow in high-heat micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part II- heat transfer characteristics*” ,Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, Issue 5, pp. 941–955

[^{٩٥}] B.S. Haynes, D.F. Fletcher (2003) ,”*Sub cooled flow boiling heat transfer in narrow Passages*” ,Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3673-3882

[^{٩٦}] A. Serizawa, Z. Feng, Z. Kawara (2002) ,”*Two Phase Flow in Microchannel*” ,Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 26, pp. 703-714

[^{٩٧}] N.T.Nguyen, S.T. Wereley (2002) ,”*Fundamentals and Applications of Microfluidics*” ,Artech House

[^{٩٨}] R. Kukowski (2003) ,”*MDT – Micro deformation Technology*” ,ASME IMECE, pp. 15-21

[^{٩٩}] Thompson, L. F., Willson, C. G., and Bowden, M. J. (1994) ,”*Introduction to Microlithography*” ,Washington, D.C.: American Chemical Society

[^{١٠٠}] S.P. Jang, S.J. Kim, K.W. Paik (2003) ,”*Experimental investigation of thermal characteristics for a microchannel heat sink subject to an impinging jet using a micro-thermal sensor array*” ,Sens. Actuators, Vol. 105, pp. 211-224

[^{١٠١}] Y.J. Youn, S.J. Kim (2012) ,”*Fabrication and evaluation of a silicon-based micro pulsating heat spreader*” ,Sens. Actuators, Vol. 174, pp.189-197

[^{١٠٢}] Shaurya Prakash and Junghoon Yeom (2014) ,” *Nanofluidics and Microfluidics Systems and Applications*” , Elsevier Inc.

- [१०५] Bharat Bhushan (2003) ,”*Springer Handbook of Nanotechnology*” ,Springer
- [१०६] <https://www.el-cat.com/silicon-properties.htm>
- [१०७] M. Madou (2002) ,”*Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*” ,CRC Press
- [१०८] <http://nptel.ac.in/>
- [१०९] K. Yogesh, Prajapati, Pathak Manabendra, Mohd. Kaleem Khan (2015) ,”A Comparative Study of Flow Boiling Heat Transfer in Three Different Configuration of Microchannels” ,Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 85, pp. 711-722
- [११०] Theodore L. Bergman, Frank P. Incropera (2011) ,”*Introduction to Heat Transfer*” ,John Wiley & Sons Inc.
- [१११] D. Liu, S.V. Garimella (2007) ,”*Flow Boiling Heat Transfer in Microchannels*” ,J. Heat Transfer, Vol. 129 ,pp. 1321-1332
- [११२] J. Lee, I. Muddawar (2007) ,”*Assesment of effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in microchannels*” ,Int. J. Heat and Mass transfer, Vol. 50, No. 3, pp. 452-463

Abstract

The heat and temperature control systems for high heat flux in industries such as electronics, aerospace, military, automotive, fuel cells, solar cells, and so has a great importance. In most cases, improving heat transfer systems by increasing their surface, which is always increases the volume and size of these devices. Two important phenomena occurring in the heat exchanger. The fluid in the flow channel between the fluid and wall heat transfer takes place. So to improve First, because the rate of heat transfer surface area to volume ratio will depend on the channels with smaller dimensions make better thermal conductivity. The use of fluids with improved properties can increase the efficiency of the heat exchanger. So one of the effective ways to ward off the heat generated by the use of micro-channel.

In the present study we investigate heat transfer in microchannels that the deionized water displacement happens there. The micro-channel heat sink with 80 parallel channels with a rectangular cross section with width of 100 μm , height 100 μm , and the length is 20 mm. The channels made of silicone with a specific orientation <110>, which was created by wet etch. In this paper, we study the heat transfer coefficient of a constant heat flux (41.378 kW / m ²) with three different mass flow rate.

Keywords: Microchannel, Heat Transfer, Silicon, Heat Transfer Coefficient, Two-phase Flow



**University of Shahrood
Faculty of Mechanical Engineering**

Master of Science Thesis

Investigation of Two-Phase Flow in Microchannel

Seyyed Yashar Ghorashi

Supervisors:

**Dr. Mohammad Hassan Kayhani
Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan
Dr. Ali Abbas Nejad**

September 2016