

FOCUSED ION BEAM MICROMACHINING

Al Antoni Akhmad

Jurusan Teknik Mesin -Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jl. Raya Palembang-Prabumulih KM 32 Kec. Inderalaya 30662 -OI
E-Mail : alantoni78@yahoo.com

ABSTRAK

Produk-produk modern yang dikembangkan sekarang banyak memiliki ukuran yang semakin kecil dalam skala mikrometer. Proses pembuatan komponen dalam skala mikrometer tersebut dapat dilakukan dengan Focused Ion Beam (FIB). Seiring dengan perkembangan zaman karena kemampuannya dapat digunakan untuk memproduksi benda-benda berukuran mikro maka FIB ini dikembangkan dengan micromachining atau sering disebut dengan Focused Ion Beam Micromachining (FIBM).

Teknologi FIBM memiliki keunggulan dibandingkan teknik-teknik micromachining lainnya dikarenakan resolusi spasialnya yang tinggi dan kemampuan untuk pabrikasi tanpa maskant. Dengan mengatur parameter-parameter pemesinan, struktur-struktur dengan bentuk tiga dimensi kompleks yang berukuran mikro dapat dibuat dengan FIBM ini.

Kata Kunci: *Focused Ion Beam, Micromachining*

I. PENDAHULUAN

Miniaturisasi banyak dikembangkan dalam teknologi pabrikasi modern. Produk-produk modern yang dikembangkan sekarang banyak memiliki ukuran yang semakin kecil dalam skala mikrometer. Proses pembuatan komponen dalam skala mikrometer tersebut dapat dilakukan dengan *focused ion beam* (FIB).

FIB memiliki panjang gelombang yang sangat pendek dan kepadatan energi yang sangat tinggi sehingga dapat digunakan sebagai metode pabrikasi langsung dari struktur yang memiliki bentuk dengan ukuran yang lebih kecil dari 1 μ m. Dikarenakan hal ini maka FIB belakangan ini banyak digunakan sebagai alternatif untuk pembuatan perangkat mikro dengan kualitas tinggi dan mikrostruktur dengan ketelitian tinggi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Focused Ion Beam*

Focused ion beam (FIB) adalah teknik pabrikasi yang banyak digunakan di industri semikonduktor dan bidang ilmu teknik material untuk analisis, deposisi, dan pengikisan material.

FIB adalah perangkat yang menyerupai *scanning electron microscope* (SEM). Bedanya SEM menggunakan sinar elektron yang terfokuskan untuk menginderaan sampel di ruang uji, sedangkan FIB menggunakan sinar ion gallium yang terfokuskan. Gallium dipilih karena proses pembuatan *liquid metal ion source* (LMIS) dari gallium relative mudah. Pada LMIS gallium, logam gallium cair disentuhkan dengan jarum tungsten kemudian dipanaskan. Gallium akan membasahi jarum tungsten dan medan listrik yang besar (lebih besar dari 10⁸ volt per centimeter) yang akan menyebabkannya terionisasi dan terbentuknya medan emisi dari atom gallium. FIB juga dapat digabungkan pada sistem dengan gabungan sinar ion dan elektron, sehingga karakteristik yang sama dapat diteliti dengan kedua sinar.

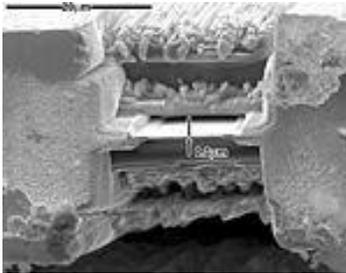
Ion yang dihasilkan kemudian dipercepat menjadi energi sebesar 5-50 keV dan kemudian difokuskan ke sampel dengan lensa elektrostatik. FIB dapat meneruskan puluhan nanoampere arus ke benda kerja.

Berbeda dengan SEM, FIB pada dasarnya bersifat destruktif pada benda kerja. Ketika ion gallium berenergi tinggi mengenai benda kerja, ion-ion tersebut akan memercikkan (*sputter*) atom-atom dari permukaan benda kerja. Atom-atom gallium juga akan tertanam pada beberapa nanometer permukaan benda kerja sehingga permukaan akan menjadi *amorf*.

Karena kemampuan *sputtering* ini, FIB juga digunakan sebagai perangkat untuk *micro-machining*, untuk proses pemesinan pada skala mikro dan nano.

FIB juga dapat digunakan untuk mendepositkan material melalui deposisi oleh sinar ion. Deposisi uap kimia yang dibantu oleh FIB terjadi bila gas seperti tungsten carbonyl ($W(CO)_6$) dimasukkan kedalam ruangan vakum dan dibiarkan untuk terserap ke dalam sampel. Dengan memindai sebuah area dengan sinar ion, gas tersebut akan terdekomposisi menjadi komponen-komponen volatil dan non volatil. Komponen non volatil (yang tidak mudah menguap) seperti tungsten, akan tinggal pada permukaan benda kerja sebagai deposisi. Logam yang terdeposisi ini dapat digunakan sebagai lapisan pelindung (*sacrificial layer*) untuk melindungi benda kerja dari efek *sputtering* yang destruktif dari sinar ion. Material lain seperti platinum juga dapat dideposisi.

FIB banyak digunakan di industri semikonduktor untuk menambal atau memodifikasi peralatan semikonduktor. FIB juga merupakan teknik yang umum digunakan untuk mempersiapkan sampel *transmission electron microscope* (TEM). Dimana TEM memerlukan sampel yang sangat tipis, dengan tebal sekitar 100 nanometer (Gambar 1).



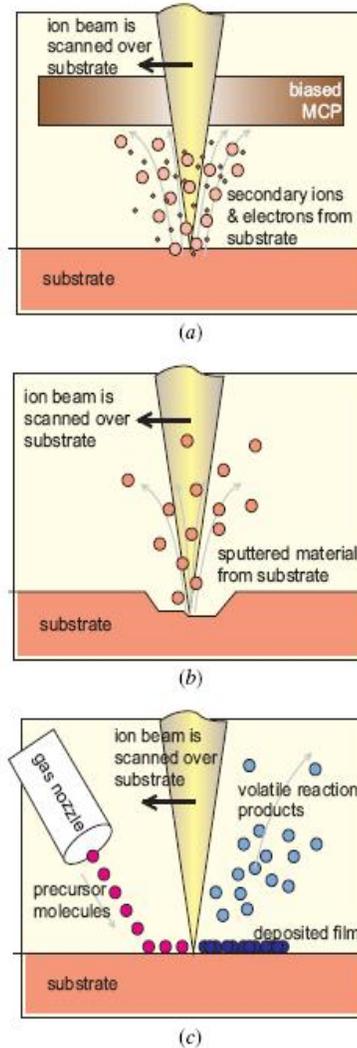
Gambar 1 Sampel TEM

Kerugian dari persiapan sampel dengan menggunakan FIB seperti telah disebutkan sebelumnya adalah pengrusakan permukaan dan implantasi ion, yang menghasilkan efek yang nyata pada penginderaan dengan resolusi tinggi seperti “*lattice imaging*” TEM atau *electron energy loss spectroscopy*. Lapisan yang rusak ini dapat dibuang dengan *milling* lebih lanjut dengan menggunakan sinar argon dengan tegangan rendah setelah proses FIM.

Sistem FIB juga dapat membuang (*mill*) material dari area tertentu dengan dimensi dalam satuan mikron persegi, atau mendepositkan material ke permukaan benda kerja. Milling dilakukan dengan mempercepat ion galium yang terkonsentrasi ke satu titik tertentu, yang kemudian akan mengetsa material yang terekspos, dan meninggalkan lubang atau permukaan

yang bersih. Dengan menambahkan gas atau pada gas organik, FIB dapat digunakan untuk mengetsa suatu material lebih cepat dari material sekelilingnya atau mendepositkan logam atau oksida.

Seperti disebutkan diatas, aplikasi FIB dapat dibagi menjadi FIB *Imaging* (Gambar 2.a), FIB *milling* (Gambar 2.a) dan FIB *Deposition* (Gambar 2.a).



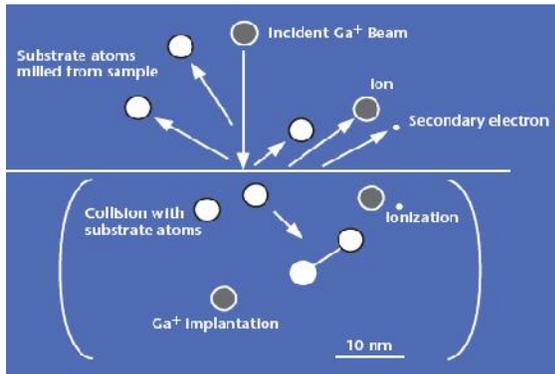
Gambar 2 Aplikasi-Aplikasi FIB

2.2 Sumber Ion

Sumber ion yang digunakan sebagai *liquid metal ion source* antara lain Al, As, Au, Be, Bi, Cs, Cu, Ga, Ge, Er, Fe, H, In, Li, Ni, P, Pb, Pd, Pr, Pt, Si, Sn, U dan Zn. Banyak dari jenis-jenis ion ini dihasilkan dari sumber paduan logam cair karena logam murni titik leleh tinggi dan bersifat reaktif. Jenis ion yang banyak digunakan untuk fabrikasi struktur mikro adalah As, Be, Ga, dan Si.

2.3 Interaksi Ion-Solid

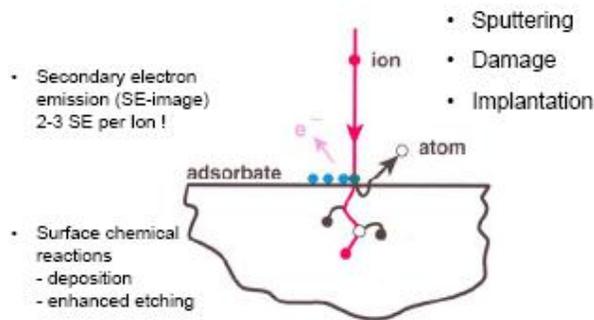
Ion berenergi dapat berinteraksi dengan permukaan target bergantung dari energi dari ion tersebut. Interaksi tersebut dapat berupa *swelling*, deposisi, *sputtering*, redeposisi, implantasi, atau reaksi nuklir. Beberapa interaksi tidak sepenuhnya berdiri sendiri dan dapat menyebabkan efek samping yang perlu dimengerti dan dipahami untuk aplikasi tertentu.



Gambar 3 Reaksi Ion-Solid

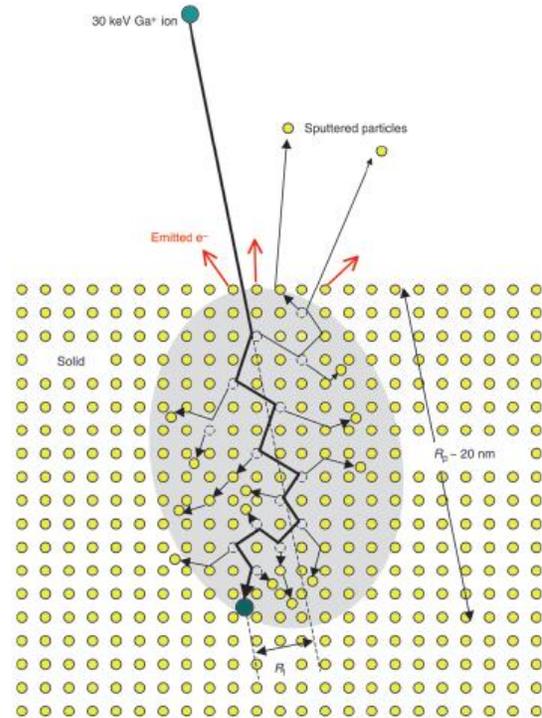
Pada umumnya energi ion optimal yang dibutuhkan untuk menyebabkan rangkaian tumbukan pada kebanyakan material teknik berkisar antara 10-100 keV. Bila energi yang diberikan lebih besar dari 100 keV, terjadi implantasi karena ion dapat dengan mudah menembus dan terjebak didalam benda kerja. Untuk energi ion lebih besar dari 1MeV, efek yang dominan adalah *backscattering* dan reaksi nuklir.

Ion Solid interaction



Gambar 4 Reaksi Ion-Solid

Efek samping yang ingin dikendalikan pada FIBM adalah pada proses sputtering, sebagian dari atom-atom atau molekul yang terkeluarkandapat terdeposit ulang pada daerah yang telah di-sputter. sehingga inti dari pengendalian FIBM adalah untuk mengontrol *sputtering* dan redeposisi dari material, sehingga sejumlah material yang tepat dapat dibuang..



Gambar 5 Reaksi Ion-Solid

Sputtering yield adalah jumlah atom yang terkeluarkan per-ion dan digunakan sebagai tolak ukur laju pembuangan material. *Sputtering yield* umumnya sekitar 1-50 atom per ion dan merupakan fungsi dari beberapa variabel seperti massa ion, massa atom, energi ion, arah tumbukan, temperatur benda kerja, fluks ion. *Yield* meningkat bila energi ion meningkat lalu turun kembali bila energi yang diberikan melewati batas dimana ion dapat menembus kedalam benda kerja. Bila hal ini yang terjadi, dimana ion menembus permukaan ke dalam benda kerja, maka efek yang terjadi adalah implantasi/doping. Implantasi terjadi bila ion terjebak di dalam material ketika energi ion habis

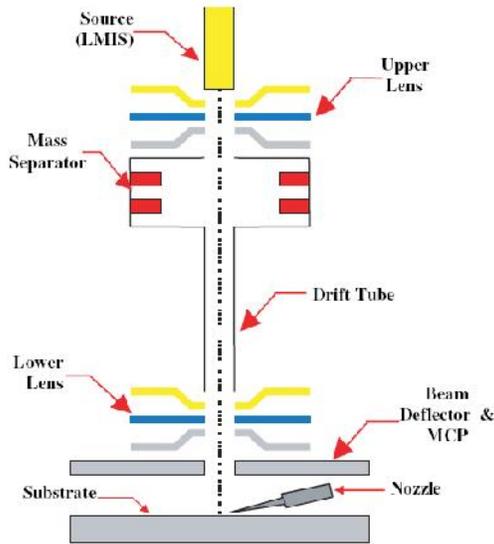
2.4 Sistem FIB

Komponen utama dari sistem FIB adalah sumber ion, ion optics column, beam deflector, dan substrate stage. Gambar 6 secara skematik menunjukkan sebuah sistem FIB dengan kolom dua lensa

Pemberian tegangan kritis Taylor pada LMIS akan mengekstraksi ion-ion bermuatan positif. Ion-ion ini kemudian dikolimasi menjadi sinar-sinar paralel oleh lensa pengkondisi pertama.

Kemudian sinar ion diteruskan melalui pemisah massa dan *drift tube*. Pemisah massa digunakan sehingga hanya sejumlah ion yang dibutuhkan dengan perbandingan massa-muatan yang tetap yang dapat

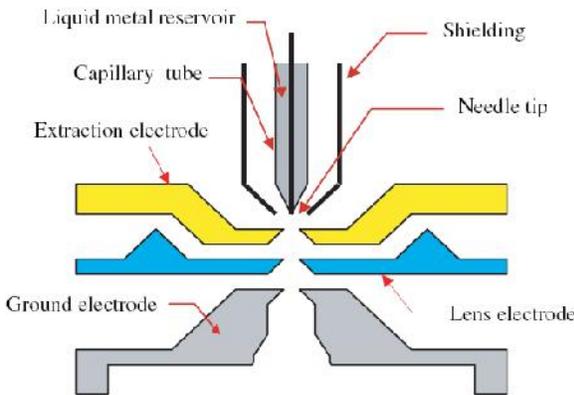
lewat. *Drift tube* kemudian menghilangkan ion-ion yang tidak terarah tepat vertikal. Lensa objektif diletakkan dibawah *drift tube* dan berfungsi untuk mengururangi ukuran notkah dari sinar ion dan memperbaiki fkus. Setelah lensa objektif adalah deflektor sinar elektrostatik,yang mengendalikan lintasan akhir atau lokasi penembakan ion di benda kerja.



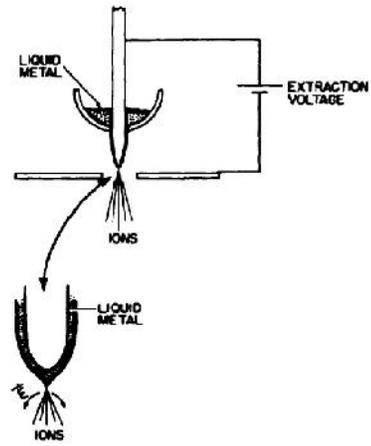
Gambar 6 Skema Peralatan FIB

2.5 LMIS (Liquid Metal Ion Source)

LMIS digunakan sebagai sumber ion yang dapat menghasilkan sinar ion yang tunak dan konsisten untuk bebagai jenis ion. LMIS terdiri dari: Tabung kapiler dengan jarum di dalamnya, *Extraction electrode*, dan *shielding* (Gambar 7). Tabung kapiler berfungsi sebagai *reservoir* yang memberikan logam cair ke ujung jarum. Interaksi antara gaya elektrosatis pada *extraction electrode* dan tegangan permukaan menyebabkan meniskus logam cair membentuk ujung tajam yang disebut *Taylor Cone* (Gambar 8).



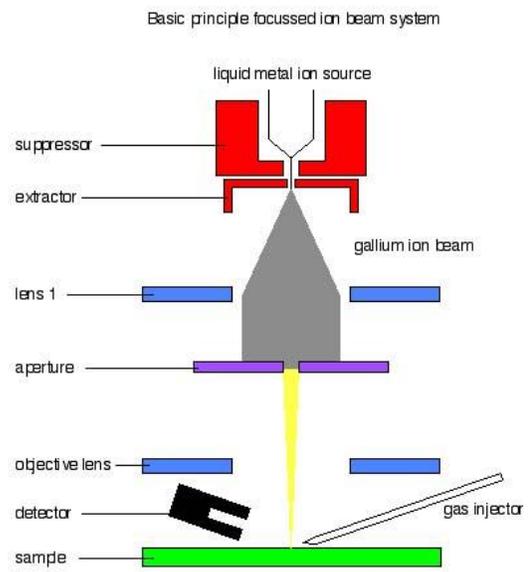
Gambar 7 LMIS



Gambar 8 Taylor Cone

2.6 FIB untuk pencitraan

Cara kerja dari FIB untuk pencitraan hampir sama seperti SEM, namun sebagai pengganti elektron, digunakan ion. Ketika ion menumbuk sampel, ion sekunder dan elektron sekunder terpancar dari permukaan. Kadar elektron atau ion yang terpancar inilah yang dipindai dan digunakan untuk mendapatkan hasil pencitraan dari permukaan. Dikarenakan elektron sekunder dihasilkan dalam jumlah yang jauh lebih besar daripada ion, maka citra yang dihasilkan akan memiliki kualitas yang lebih baik dengan resolusi yang lebih tinggi. Skema peralatan FIB imaging diperlihatkan pada Gambar 9.



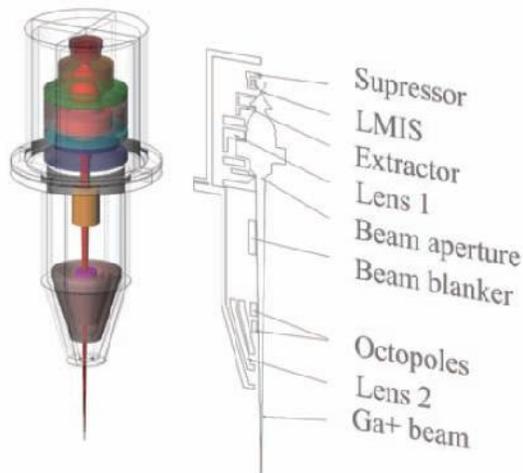
Gambar 9 Skema Peralatan untuk pencitraan dengan FIB

Pencitraan dengan FIB dilakukan dalam ruangan vakum dengan energi sinar sekitar 30-50 keV dan arus

antara 1-20 nA. resolusi yang dihasilkan dari pencitraan dengan FIB sekitar 5-7 nm.

III. PEMBAHASAN

FIB dapat dengan tepat membuang material dari benda pejal dengan menggunakan tembakan ion. Sinar galium yang terfokuskan dapat diarahkan untuk membentuk bentuk geometri sederhana hingga rumit, serta memotong bentuk tiga dimensi. Proses pembuangan material tidak memanaskan benda kerja dan tidak ada gaya yang signifikan pada benda kerja selama penembakan ion. Skema peralatan FIBM diberikan pada Gambar 10, terlihat bahwa peralatan yang digunakan untuk FIBM hampir sama seperti pada pencitraan dengan FIB.



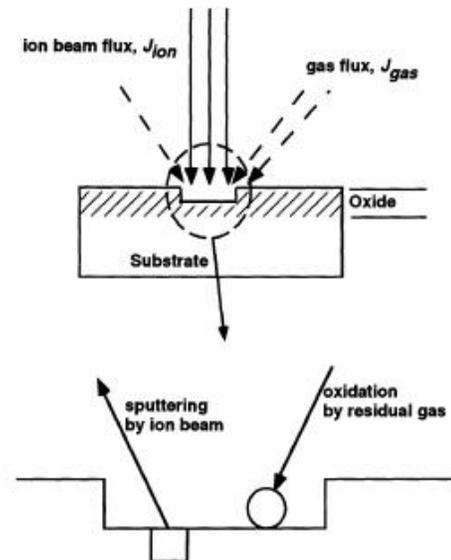
Gambar 10 Skema FIBM

3.1 FIB Milling dan FIB Deposition

Ketika ion berenergi menumbuk permukaan benda kerja, dapat terjadi beragam interaksi antar benda kerja-ion seperti:

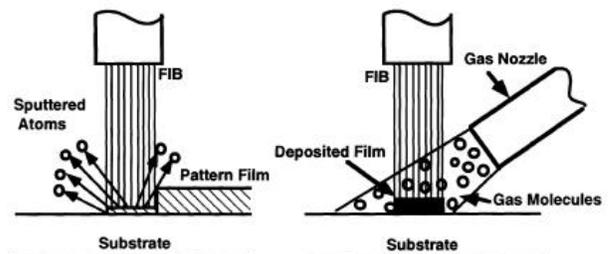
- Swelling*
- Deposition*
- Milling*
- Implantation*
- Backscattering*
- Nuclear Reaction*

Beberapa interaksi tidak dapat dipisahkan satu sama lain dan dapat menyebabkan efek samping yang mungkin ingin dihindari. Bergantung dari proses yang ingin dilakukan dan hasil yang ingin dicapai, maka yang dapat diatur adalah energi ion yang ditembakkan.



Gambar 11 Sputtering dan Deposisi

Interaksi yang diinginkan pada FIBM adalah *sputtering*, dimana tumbukan ion akan membuang material di permukaan benda kerja dan pada FIB *Deposition* yang diinginkan adalah deposisi dari material akibat reaksi antara sinar ion dengan flux gas yang diberikan (Gambar 11 dan 12)



Gambar 12 FIBM dan FIB Deposition

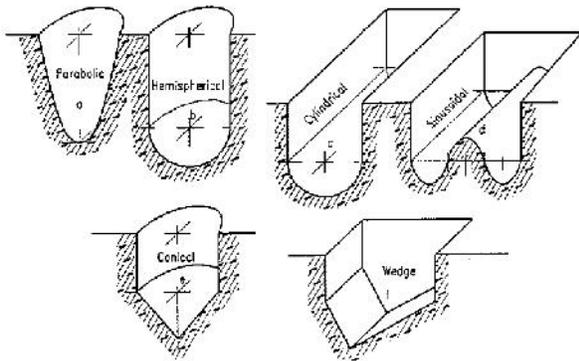
3.2 FIB Milling

Proses ion milling adalah kombinasi dari *sputtering* fisik dan redeposisi material. Tingkat kepadatan energi yang tinggi dan ukuran yang sangat kecil dari FIB mengizinkan material benda kerja dibuang dalam skala sub mikrometer, termasuk material yang tidak dapat di struktur dengan menggunakan *photolithography* standar.

Untuk aplikasi *milling*, yang diinginkan adalah ion yang ditembakkan hanya berinteraksi dengan atom-atom pada permukaan atau dekat dengan lapisan permukaan dan menyebabkan rangkaian tumbukan dengan atom-atom. Efek yang diinginkan adalah

sputtering. Bila energi atau momentum ion cukup besar, tumbukan yang terjadi dapat mentransfer energi yang cukup ke atom-atom permukaan dan melewati energi ikat permukaan benda kerja (3.8eV untuk Au dan 4.7eV untuk Si) dan atom-atom permukaan dikeluarkan. Interaksi ini disebut *sputtering* dan merupakan efek utama yang diinginkan dalam FIBM. Dikarenakan interaksi yang terjadi bergantung pada transfer momentum untuk mengeluarkan atom-atom, maka *sputtering* merupakan proses fisik murni. Laju pemesinan ($\mu\text{m}^3/\text{s}$) berbanding lurus dengan arus sinar ion. Dengan parameter-parameter yang mempengaruhi FIBM adalah ukuran sinar, bentuk sinar, arus, dan energi.

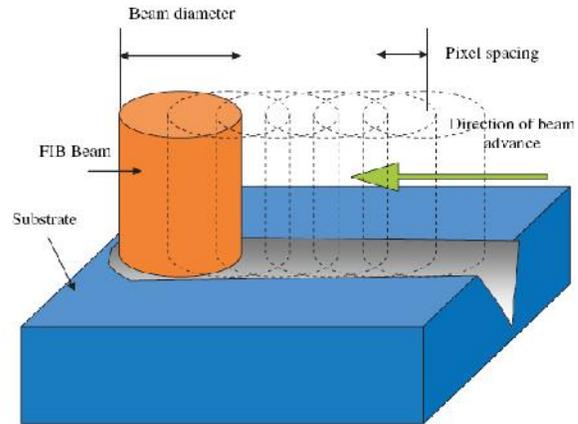
Hasil dari penembakan ion dan efek *sputtering* tergantung dari parameter-parameter diatas, dan akan mempengaruhi bentuk hasil proses *milling* yang terjadi seperti diperlihatkan pada gambar 13.



Gambar 13 Hasil dari FIBM

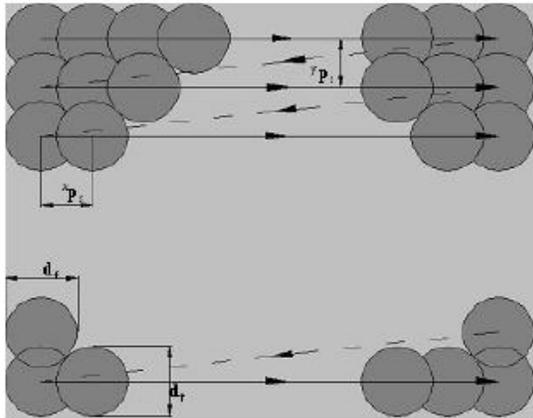
FIB *milling* dapat dibagi menjadi dua metode, yaitu *milling* langsung (FIBM) dan FIB *lithography* (FIBL). FIB *milling*, atau *Ion beam direct write process*, adalah proses pen-transfer-an pola dengan metode *direct impingement* dari sinar ion ke material (untuk pembuatan mikrostruktur 3 dimensi) dengan berbagai material kerja. Sedangkan FIB *lithography*, atau *Ion Beam Projection*, cahaya ion yang terkolimasi diteruskan melewati maskant stensil dan citra yang diperkecil dari maskan diproyeksikan ke material

Pada mesin FIBM yang dikendalikan dengan komputer, proses *milling* dilakukan dengan pergerakan pixel ke pixel yang teliti. Sistem ini disebut digital scan dan ditunjukkan pada gambar 14. Waktu dimana sinar ion tetap pada satu pixel sasaran disebut *dwell time* (t_d). Jarak antara dua pusat pixel yang berdampingan disebut *pixel spacing* (p_s).

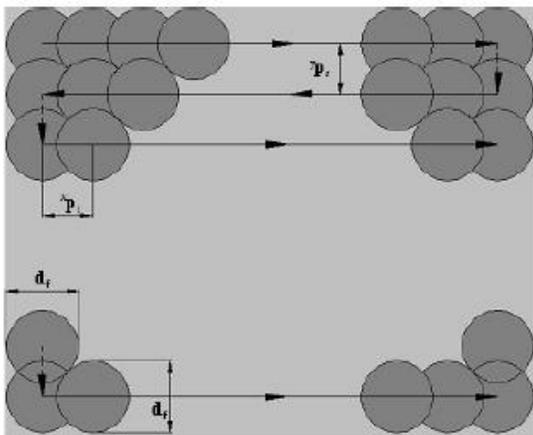


Gambar 14 Skema FIBM

Untuk proses *milling* pada benda kerja, pola pertamanya di digitalisasi menjadi susunan pixel, yang tersusun menjadi baris (garis horizontal) dan kolom (garis vertikal). Gambar 15 menunjukkan dua tipe proses scanning, raster dan serpentine scan, yang digunakan untuk mengendalikan gerakan FIB. Pada raster scan, pindaian bergerak ke arah yang sama sepanjang proses. Pada serpentine scan, arah pindaian dibalik setiap satu pindaian atau alur. mikrostruktur dengan profil tertentu dapat dilakukan dengan mengatur secara presisi laju pembuangan material pada setiap pixel dan menentukan pengkompensasian deposisi.



(a)



(b)

Gambar 15 Raster Scan dan Serpentine Scan

3.3 FIBM Dibandingkan Dengan EBM

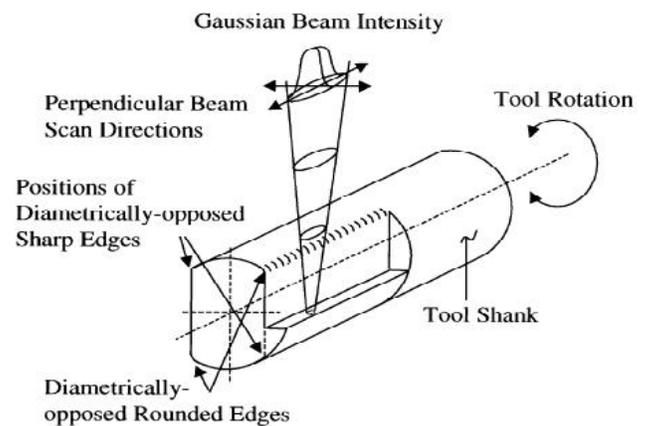
FIBM memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan *electron beam machining*. Pertama, dibandingkan foton dan elektron, ion jauh lebih berat dan dapat menumbuk dengan kepadatan energi yang lebih tinggi ke benda kerja untuk mem freis benda kerja yang keras, seperti logam semikonduktor dan keramik. Kemampuan *direct writing* dari FIB juga dapat mengurangi cacat yang disebabkan oleh penggunaan masakan dan *resists* pada pentransferan pola. Fib juga tidak menghasilkan elektron *backscattered* yang berenergi tinggi, yang membatasi lebar garis minimum yang dapat diraih dengan menggunakan e-beam. Dan kekurangan EBM adalah foton dan elektron hanya dapat dengan efektif mem freis material lunak seperti *photoresist* atau *e-beam resist*. Perbandingan antara FIBM dan EDM diberikan pada tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan Antara FIBM dengan EBM

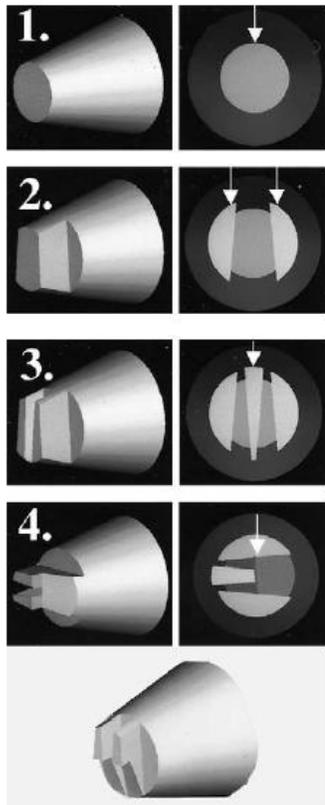
Particle	type	FIB ion	SEM electron	Ratio
	elementary charge	+1	-1	
	particle size	0.2 nm	0.00001 nm	20.000
	mass	$1.2 \cdot 10^{-26}$ kg	$9.1 \cdot 10^{-31}$ kg	130.000
	velocity at 30 kV	$2.8 \cdot 10^8$ m/s	$1.0 \cdot 10^8$ m/s	0.0028
	velocity at 2 kV	$7.3 \cdot 10^7$ m/s	$2.6 \cdot 10^7$ m/s	0.0028
	momentum at 30 kV	$3.4 \cdot 10^{-18}$ kgm/s	$9.1 \cdot 10^{-23}$ kgm/s	370
	momentum at 2 kV	$8.8 \cdot 10^{-19}$ kgm/s	$2.4 \cdot 10^{-23}$ kgm/s	370
Beam	size	nm range	nm range	
	energy	up to 30 kV	up to 30 kV	
	current	pA to nA range	pA to nA range	
Penetration depth	In polymer at 30 kV	60 nm	12000 nm	
	In polymer at 2 kV	12 nm	100 nm	
	In iron at 30 kV	20 nm	1800 nm	
	In iron at 2 kV	4 nm	25 nm	
Average electrons signal per 100 particles at 30 kV	secondary electrons	100-200	50-75	
	back scattered electron	0	30-50	
	substrate atom	300	0	
	secondary ion	30	0	
	A:IV	0	0.7	

3.4 Pemensian Mikrostruktur Dengan Profil Tertentu

Mikrostruktur dengan profil tertentu dapat dilakukan dengan mengatur secara presisi laju pembuangan material pada setiap pixel dan menentukan pengkompensasian deposisi. Sebagai contoh untuk membuat sebuah pahat dengan skala mikro, proses FIBM dilakukan bertahap dan benda kerja diputar hingga mendapatkan struktur yang diinginkan. Skema proses pembuatan pahat diberikan pada Gambar 16 dan tahapan proses pembuatan pahat mikro diberikan pada Gambar 17.



Gambar 16 Proses Pembuatan Pahat Mikro



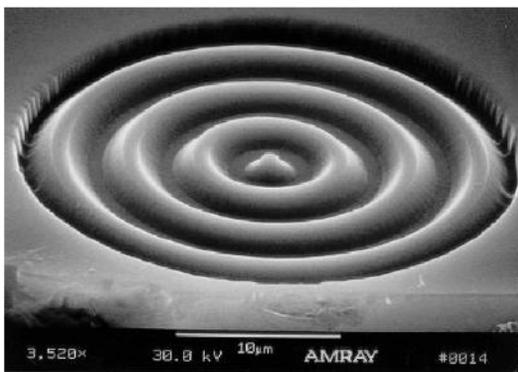
Gambar 17 Tahapan Proses Pembuatan Pahat Mikro

3.5 Contoh-contoh hasil FIBM

Berikut akan diberikan beberapa contoh hasil milling dengan menggunakan FIB.

3.5.1 Pola annular.

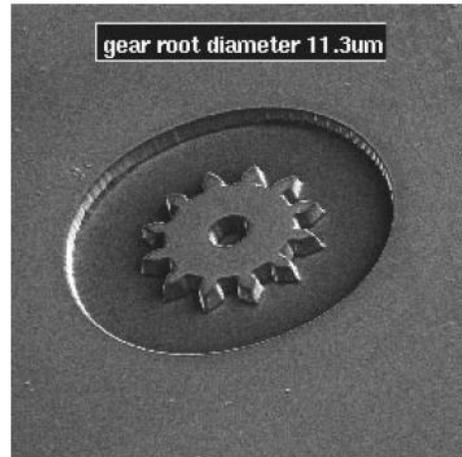
Dengan mengatur *dwell time* pada setiap piksel, *microchannel* dengan profil lengkung dapat dibuat. Gambar 18 menunjukkan *channel* dengan penampang setengah lingkaran pada silikon yang dibuat dengan menggunakan FIB Ga^+ pada 20 keV.



Gambar 18 Microchannel yang Dibuat dengan FIBM

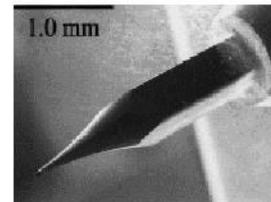
3.5.2 Komponen Mekanik

Dengan bantuan CAD, mikrostruktur tiga dimensi dapat dibuat dengan FIBM. Dengan mengatur parameter pemesinan milling depth sebagai fungsi dari parameter operasi utama, termasuk *dwell time*, dosis ion, dan ukuran sinar, FIB dengan bantuan komputer ini dapat dengan presisi membuang material pada skala sub mikrometer pada setiap pixel.

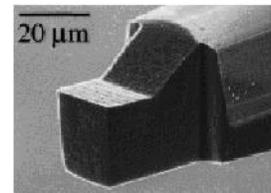


Gambar 19 Roda Gigi Mikro

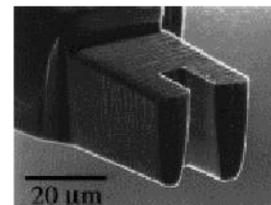
Gambar 19 menunjukkan struktur roda gigi yang di *mill* dengan dosis ion $5 \text{ nC } \mu\text{m}^{-2}$ dan ukuran sinar $150 \mu\text{m}$. Dan gambar 20 menunjukkan pahat bubut mikro dari intan yang dibuat dengan FIBM pada ujung dari blank pahat.



(a)



(b)



(c)

Gambar 20 Pahat Mikro

3.6 Keunggulan FIBM

- a. *Direct-write technique*
- b. Resolusi spasial tinggi (sekitar 10 nm)
- c. Dapat mem-*freis* dan mendepositkan material (Gambar 21)
- d. Metode yang baik untuk *maskless micromachining*
- e. Proses Pemesinan Pengurangan (*freis*) dan penambahan (*deposition*) dapat dilakukan pada satu mesin.



Gambar 21 Nano Depositioning dan Nano Mahining

- [5] Kaesmaier R and Loschner H 2000 Ion projection lithography:
- [6] Melngailis J 1987 Focused ion beam technology and applications
- [7] Melngailis J 1987 Focused ion beam technology and applications
- [8] Nuhansyah Sulaiman Achmad, Micromaching dengan Menggunakan Focused Ion Beam, ITB, 2008
- [9] www.wikipedia.org
- [10] www.fibics.com
- [11] <http://www.nlectc.org>
- [12] www.imec.be

IV. KESIMPULAN

1. FIBM merupakan salah satu metode pemesinan yang dapat dilakukan oleh FIB
2. Teknologi FIBM memiliki keunggulan dibandingkan teknik-teknik *micromachining* lainnya dikarenakan resolusi spasialnya yang tinggi dan kemampuan untuk fabrikasi tanpa maskant.
3. Dengan mengatur parameter-parameter pemesinan pada FIBM, struktur-struktur dengan bentuk tiga dimensi kompleks dapat dibuat.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adams D P, Vasile M J and Krishnan A S M 2000 Microgrooving and microthreading tools for fabricating curvilinear features
- [2] Bischoff L, Teichert J and Heera V 2001 Focused ion beam sputtering investigations on SiC Appl. Surf. Sci
- [3] Blauner P G, Butt Y, Ro J S and Melngailis J 1989 Focused ion beam fabrication of submicron gold structures
- [4] Harriott L R 1990 Beam-size measurements in focused ion beam systems